



# Validation du code NSI3FS sur des écoulements turbulents autour d'un tablier de pont élémentaire

Emmanuel Briand, Serge Piperno

## ► To cite this version:

Emmanuel Briand, Serge Piperno. Validation du code NSI3FS sur des écoulements turbulents autour d'un tablier de pont élémentaire. [Rapport de recherche] RT-0283, INRIA. 2003, pp.63. inria-00069895

**HAL Id: inria-00069895**

**<https://hal.inria.fr/inria-00069895>**

Submitted on 19 May 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

***Validation du code NSI3FS sur des écoulements  
turbulents autour d'un tablier de pont élémentaire***

Emmanuel Briand — Serge Piperno

**N° 0283**

Juillet 2003

THÈME 4



***apport  
technique***



# Validation du code NSI3FS sur des écoulements turbulents autour d'un tablier de pont élémentaire

Emmanuel Briand , Serge Piperno \*

Thème 4 — Simulation et optimisation  
de systèmes complexes  
Projet CAIMAN

Rapport technique n° 0283 — Juillet 2003 — 63 pages

**Résumé :** Le code NSI3FS permet d'étudier l'effet du vent sur des profils de ponts et l'apparition d'instabilités aéroélastiques. Ce rapport fait suite à une série de travaux de validation sur des géométries simples qui ont mis en évidence les bonnes prédictions des coefficients aéroélastiques en oscillation forcée laminaire. En régime turbulent et en structure fixe, le modèle  $k - \epsilon$  utilisé présentait des déficiences dans les zones de recirculation, ce qui jetait un doute sur les capacités du code à bien prédire les domaines d'instabilités aéroélastiques de structure à haut Reynolds.

Des simulations ont été effectuées pour quantifier ce mauvais comportement et un modèle bi-couche a été proposé et testé. En régime fixe les écoulements obtenus sont encourageants. Pourtant l'apparition de phénomènes tourbillonnaires basses fréquences a nécessité l'utilisation de gros maillages et de temps de simulation très longs, en particulier pour des études en oscillation forcée. Pour ces dernières il semble être nécessaire de très bien décrire la dynamique tourbillonnaire et il n'est pas sûr que ces modèles de turbulence moyenné parviennent à le faire.

\* INRIA-CERMICS, email: Serge.Piperno@sophia.inria.fr

**Mots-clés :** Interaction fluide-structure, détachement tourbillonnaire, turbulence, modèle  $k - \epsilon$

# Validation of the NSI3FS code on turbulent flows around an elementary bridge deck

**Abstract:** The NSI3FS code is used to study the wind effect on bridge decks and aeroelastic instabilities. This report is in the continuity of validation works on elementary geometries which have shown a good aeroelastic coefficients prediction on laminar forced oscillation. On turbulent flows and fixed structure, the  $k - \epsilon$  model used previously disclosed discrepancies in the recirculation zones, which cast shadows on the ability of NSI3FS to predict correct aeroelastic instability domains for high Reynolds structures.

Simulations was launched to quantify this bad behavior and a two-layer model was proposed and tested. On fixed regime, the obtained flows were encouraging and best recirculations were produced. Nevertheless the arising of low frequency vortex events imposed the use of big meshes and long time runs, even more for forced oscillations studies. In fact to predict correctly the aeroelastic coefficients, it seems necessary to describe very precisely the vortex dynamic and it is not sure that the averaged turbulence models are able to do that.

**Key-words:** Fluid-Struture interaction, vortex shedding, turbulence,  $k - \epsilon$  models

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Validation de NSI3 sur un profil en R4</b>	<b>6</b>
2.1	Présentation . . . . .	6
2.2	Maillage M1-125 . . . . .	10
2.2.1	Simulation DT0.1-Re500 . . . . .	10
2.2.2	Simulation DT0.02-DEL0.01 . . . . .	10
2.3	Maillage M1-250 . . . . .	18
2.3.1	Simulation DT0.01-DEL0.01 . . . . .	18
2.4	Maillage SYM-125 . . . . .	22
2.4.1	Simulation DT0.02-DEL0.01 . . . . .	22
2.5	Maillage SYM-250 . . . . .	26
2.5.1	Simulation DT0.01-DEL0.01 . . . . .	26
2.5.2	Simulation DT0.01-DEL0.01-Tu0.3 . . . . .	26
2.5.3	Simulation PAS-DE-PAROI-DT0.01 . . . . .	28
2.6	Maillage SYM-500 . . . . .	36
2.6.1	Simulation DT0.01-DEL0.01 . . . . .	36
2.7	Maillage SYM-250-B2-Y5 . . . . .	40
2.7.1	Simulation DT0.01-NC3 . . . . .	40
2.8	Maillage SYM-250-B7-Y2 . . . . .	45
2.8.1	Simulation DT0.01-NC16 . . . . .	45
2.9	Maillage SYM-178-B2-Y5 . . . . .	49
2.9.1	Simulation DT0.01-NC7 . . . . .	49
2.10	Maillage SYM-178-B7-Y2 . . . . .	53
2.10.1	Simulation DT0.01-NC16 . . . . .	53
2.10.2	Simulation en régime d'oscillation forcée . . . . .	54
2.11	Synthèse . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Conclusions</b>	<b>62</b>

# 1 Introduction

Cette étude participe à la validation du code d'interaction fluide structure NSI3FS. Ce code permet de prédire le comportement d'une structure solide plongée dans un écoulement fluide. L'exemple que nous allons considérer est un tablier de pont mis en mouvement sous l'action du vent. Il existe trois régimes possible pour les simulations. Un fixe, c'est à dire que la structure est immobile, on regarde alors simplement l'écoulement autour du profil et les forces exercées sur celui-ci. Le second est le régime forcé (oscillation et/ou translation), on s'attache alors à caractériser l'instabilité de telle ou telle fréquence de forçage. Enfin le troisième est un régime libre où à partir des caractéristiques dynamiques de la structure (masse, moment d'inertie, rigidité), on laisse le fluide la mettre en mouvement.

Ici on utilisera principalement le premier régime. En effet de précédentes études ont montré que l'on arrivait assez bien à prédire le domaine d'instabilité d'une structure mais que par contre la description de l'écoulement autour de cette structure était plus mauvaise.

Ici nous n'avons utilisé qu'un profil en R4 sur lequel beaucoup de résultats ont été publiés. Comme dans le régime de Reynolds qui nous intéressent est turbulent, nous avons utilisé les modèles de turbulence moyennée présents dans le code. Des études précédentes (cf Rapport de Recherche INRIA No 3875 par Pierre-Emmanuel Bournet janv 2000) ont montré que le modèle k-epsilon avec loi de paroi ne parvenait pas à fournir de bons résultats. Nous nous sommes donc attachés à analyser les causes de ces mauvaises performances (visualisations et statistiques) puis grâce à une suggestion de Goradz Medic nous avons essayé un modèle de turbulence bi-couche. Une série de simulations en régime fixe sur différents maillages a été réalisé jusqu'à ce qu'un écoulement satisfaisant ait été obtenu. Finalement les résultats d'une simulation en régime forcé ont été comparés à ceux obtenu en régime laminaire par Gilles Fourestey dans sa thèse.



## 2 Validation de NSI3 sur un profil en R4

### 2.1 Présentation

Nous présentons ici les simulations effectuées sur des profils en R4 avec le code NSI3 à l'ordre 1. La pression sur le profil est comparée avec des résultats expérimentaux du CSTB. Le Reynolds de l'expérience est de l'ordre de  $10^6$  mais numériquement la dissipation du code ne nous permet probablement pas d'aller au-delà de  $10^4$ . Ces calculs font suite à ceux déjà réalisés par Serge Piperno et Pierre-Emmanuel Bournet qui nous ont donnés des indications sur les valeurs des paramètres à utiliser (pas de temps et delta du modèle loi de paroi).

#### **Les Maillages:**

Les maillages listés à gauche ont les même dimensions ( $H=1$ ,  $L=4$ ) et les vitesses d'entrée sont fixées à  $U_{inflow} = 1$ . Ces maillages ont été générés avec le logiciel emc2 puis extrudés sur  $Dz = 1$ .

**Remarque :** Les simulations de Serge et Pierre-Emmanuel utilisaient des grandeurs physiques (taille du R4, vitesse d'entrée etc...). Il faut donc prendre cela en compte quand on compare les valeurs des pas de temps, des delta ou de la portance.

#### **Conventions de nommage:**

Le premier nombre dans les noms des maillages correspond au nombre de points sur le profil 2D. Pour les maillages raffinés à la paroi, j'ai simplement ajouté quelques couches structurées autour du profil et décalé la base des triangles des maillages de départ. Ainsi B2 ou B7 correspondent aux nombres de couches rajoutées, Y5 ou Y2 à la hauteur moyenne de la première couche ( $Y+=5$  ou  $2$ ). Certains maillages sont symétriques (par rapport à l'axe longitudinal du R4) pour vérifier que les asymétries mesurées sur les profils de pression ne viennent pas du maillage (préfixes "SYM\_").

#### **Les résultats expérimentaux:**

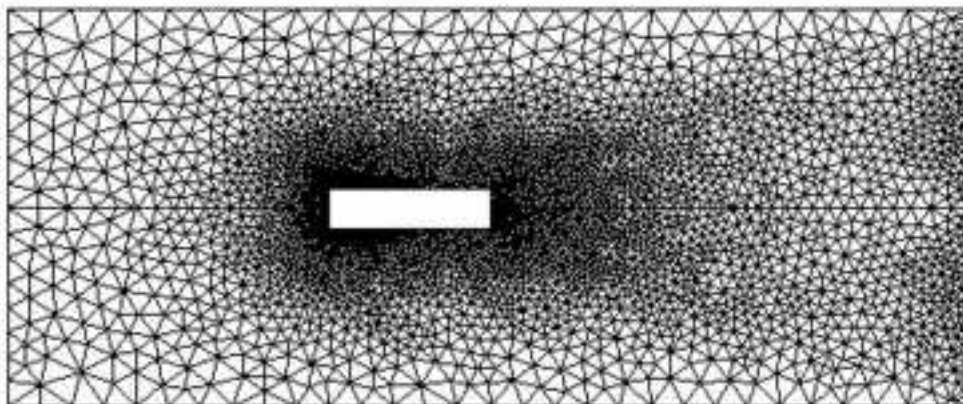


FIG. 1 – *Exemple de maillage symétrique.*

Les mesures de pression sont faites avec 64 capteurs répartis sur tout le profil. Elles ne sont globalement pas périodiques même s'il semble que l'on retrouve



FIG. 2 – *Abscisse curviligne normalisée des coins.*

la fréquence des lâcher de tourbillon de l'allée de Von Karman (la fréquence d'échantillonnage est insuffisante pour en être sûr : 5 points par période de lâcher des tourbillons). Pour cette même raison les écart-types expérimentaux de pression ne nous semblent pas très fiables. Sur certains capteurs on peut retrouver une semi-périodicité et même des points fixes en aval des coins amonts.

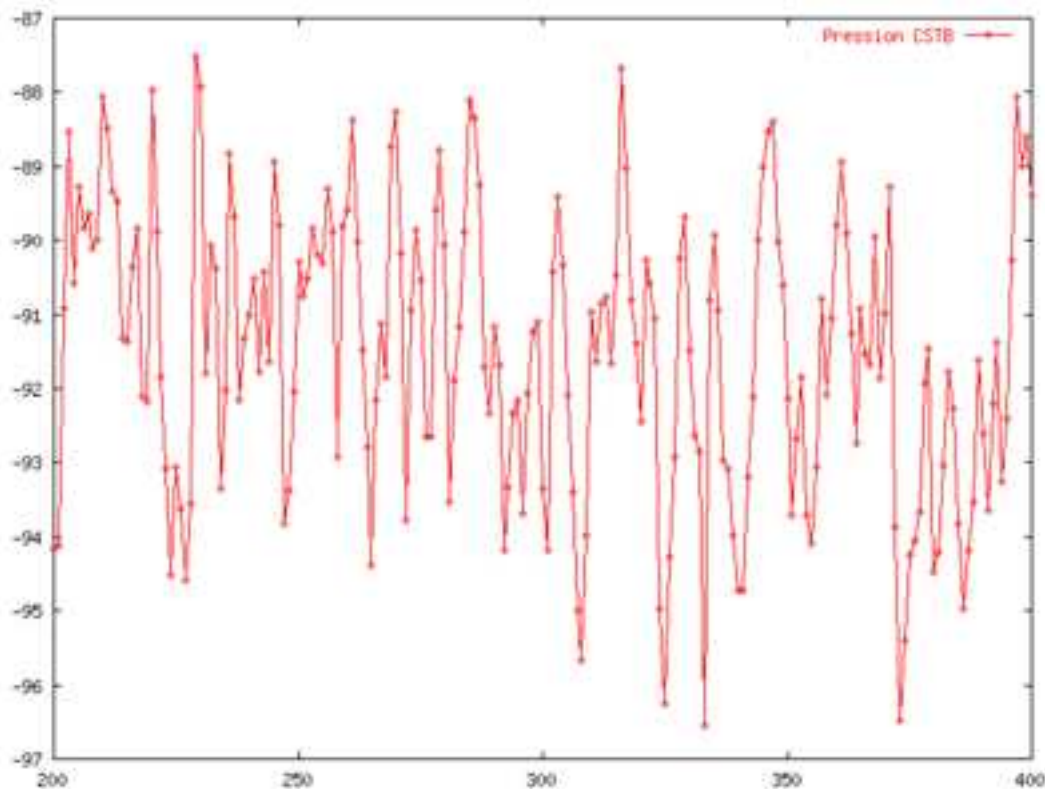


FIG. 3 – *Exemple de mesures de la pression moyenne sur le profil*

Physiquement il semble que ces mesures correspondent à des tourbillons qui se forment dans la zone cisaillement générées par les coins amonts. La non-périodicité vient de la trajectoire de ces tourbillons sur le profil qui est très sensible à leur position initiale (interaction entre les tourbillons, avec le flot moyen et avec l'allée de Von Karman du sillage).

Le profil de pression 3 qui en découle présente un plateau en aval des coins amonts, une remontée dans la zone de recollement et une dépression sur la face aval. Ce sont ces caractéristiques que nous allons essayer de reproduire avec NSI3.

**Remarque :** Ce profil est asymétrique au niveau des zones de recollement. Une explication possible est que l'angle d'attaque durant l'expérience n'ait pas été nul. A partir de la valeur moyenne de la portance mesurée, on a proposé un angle de 1.9 degré. Pourtant des simulations effectuées avec cet angle d'attaque n'ont pas reproduit l'asymétrie constatée.

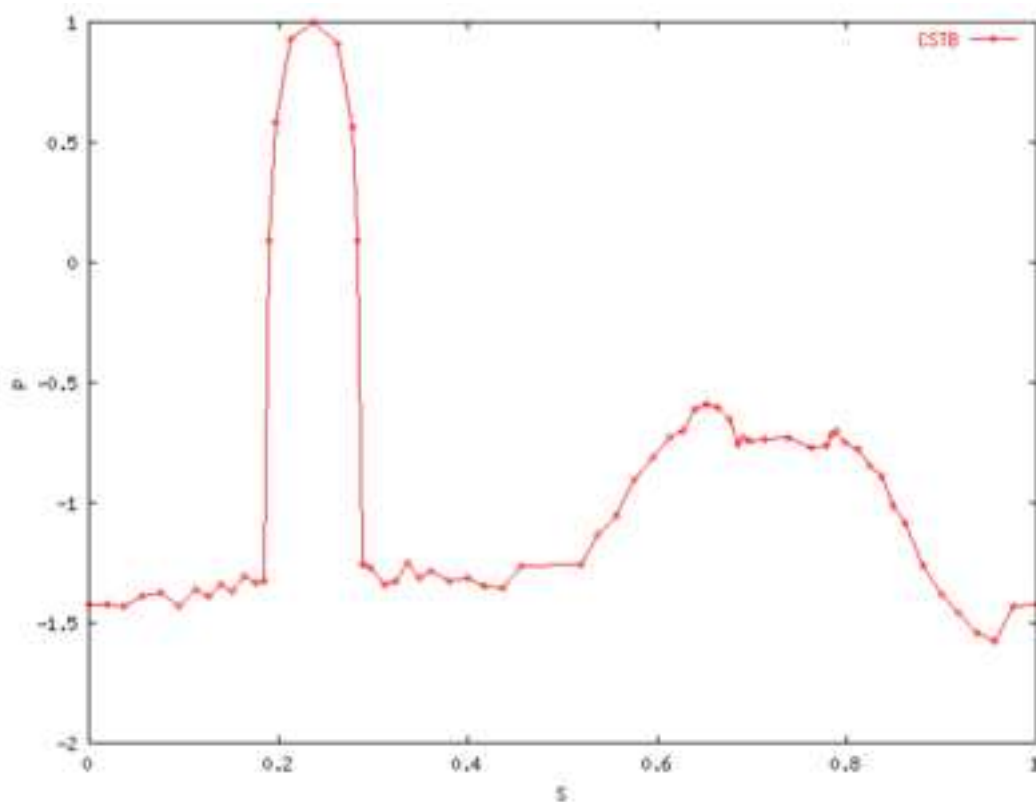


FIG. 4 – Profil de pression expérimental.

## 2.2 Maillage M1-125

Nombre de sommets	10000
Nombre de points sur la structure	248
Raffinement sur la paroi	Isotrope
Nombre de couches structurées à la paroi	0
$y+$ moyen du premier point	300

### 2.2.1 Simulation DT0.1-Re500

Turbulence	non
Reynolds	500
Pas de temps	0.1
Delta de la loi de paroi	-
Temps total de la simulation	200.

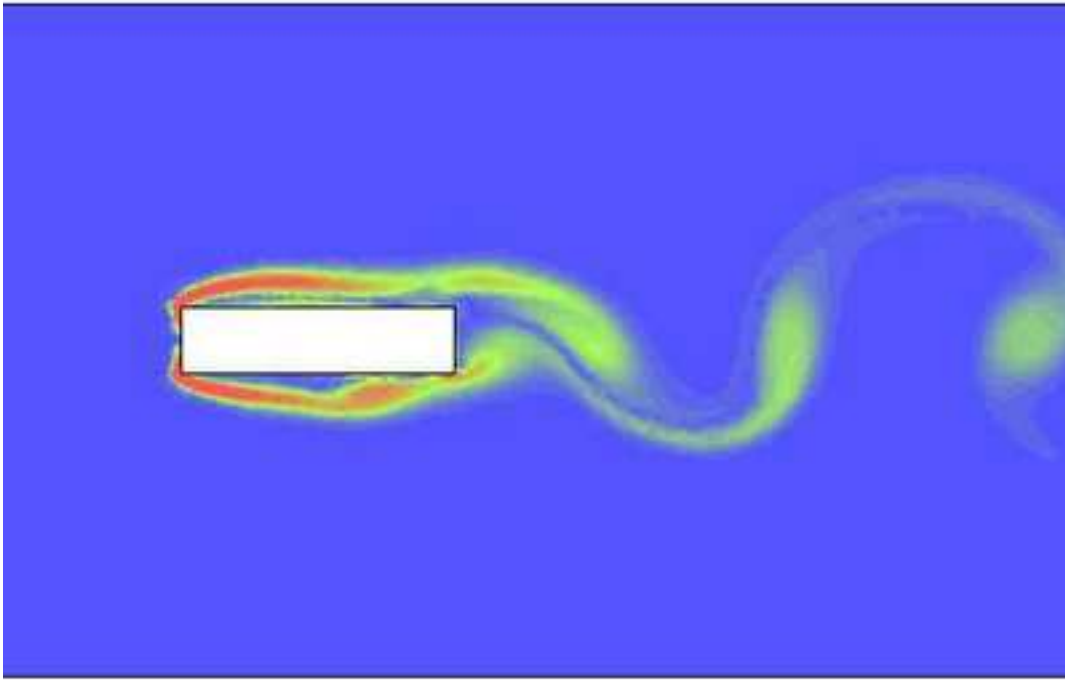
#### Commentaires:

Il n'y a pas plateau de pression en aval des bords d'attaque et il n'y a pas de tourbillons. Pourtant les écart-types de pression ont le bon profil et les bons niveaux. La solution est périodique. Strouhal de l'allée de Von Karman : 0.13.

Cette simulation est la référence en régime laminaire. Comme on le verra à la fin (voir 2.10.2), malgré ses défauts, c'est elle qui donne les meilleurs résultats en oscillation forcée. La dynamique tourbillonnaire n'est pas décrite (par rapport à un Reynolds supérieur à  $10^5$ ) et il semble que ce soit mieux que de mal le faire.

### 2.2.2 Simulation DT0.02-DEL0.01

Turbulence	k-epsilon standard et loi de paroi $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.02
Delta de la loi de paroi	0.01
Temps total de la simulation	200.

FIG. 5 – *Vorticité autour du profil.***Commentaires:**

Pas de temps et delta ok mais la dépression aux coins amonts est trop grande (mauvaise résolution des coins), le plateau de pression en aval des bords d'attaque est trop haut (pb du modèle), il y a une dépression en amont du bord de fuite (accrochage des tourbillons), les variations de pression sont surévaluées. Des tourbillons se forment au-dessus du profil mais un tourbillon a tendance à davantage s'accrocher sur le bord de fuite supérieur. Ce qui conduit à une dissymétrie dans les profils de pression.

La solution n'est plus périodique et présente des phénomènes basse fréquence (entraînement des tourbillons accrochés au profil). Strouhal de l'allée de Von Karman : 0.13.

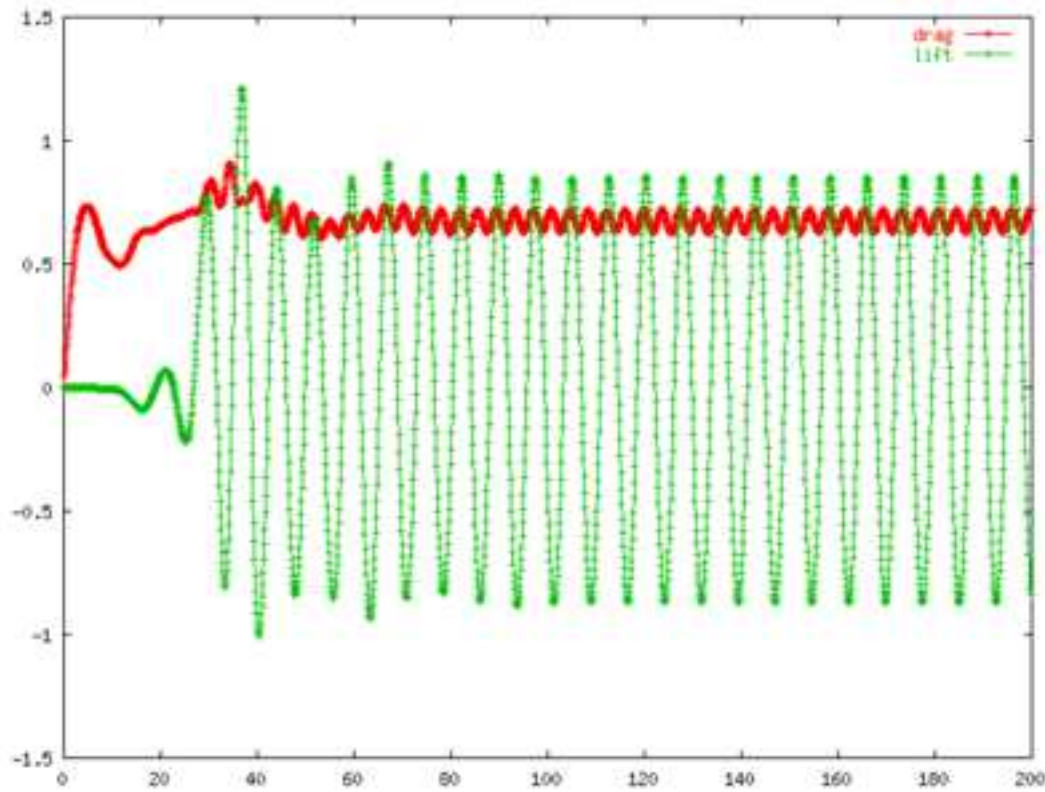


FIG. 6 – *Évolution de la traînée et de la portance*

**Remarque :** La dissymétrie ne semble pas provenir du fenêtrage des statistiques mais bien d'une différence du comportement du flot entre les bords supérieur et inférieur. Cela dit peut-être qu'une simulation beaucoup plus longue donnerait une solution en moyenne plus symétrique.

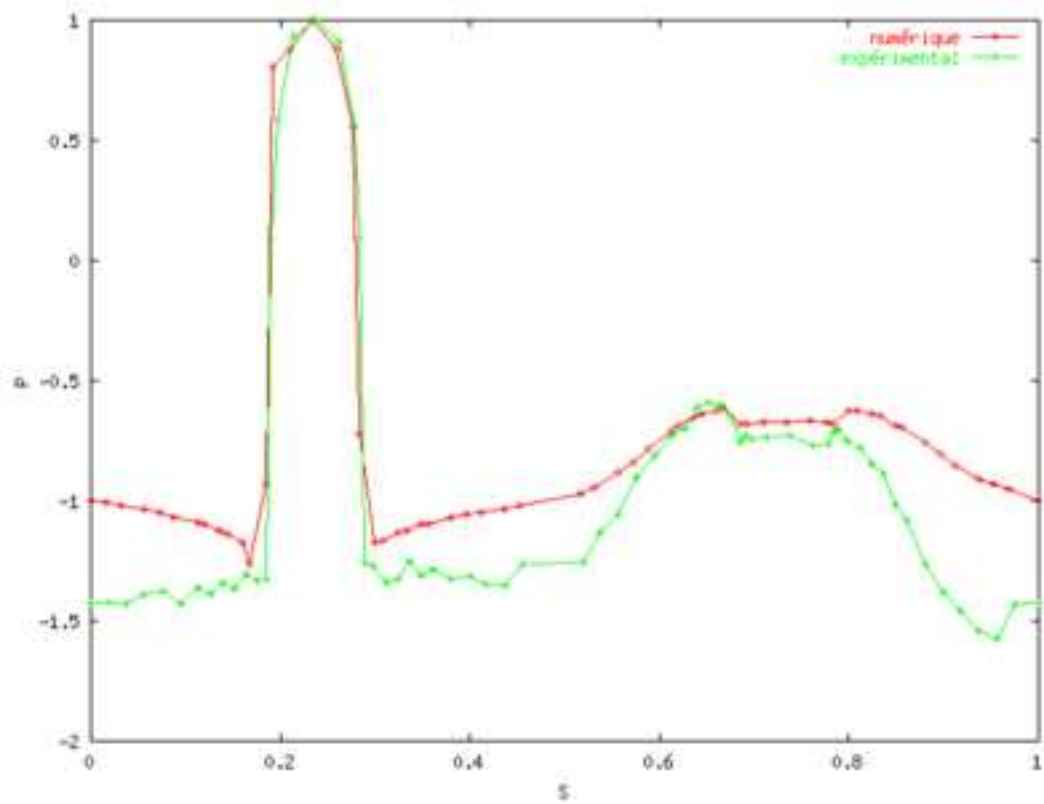


FIG. 7 – Profil de pression



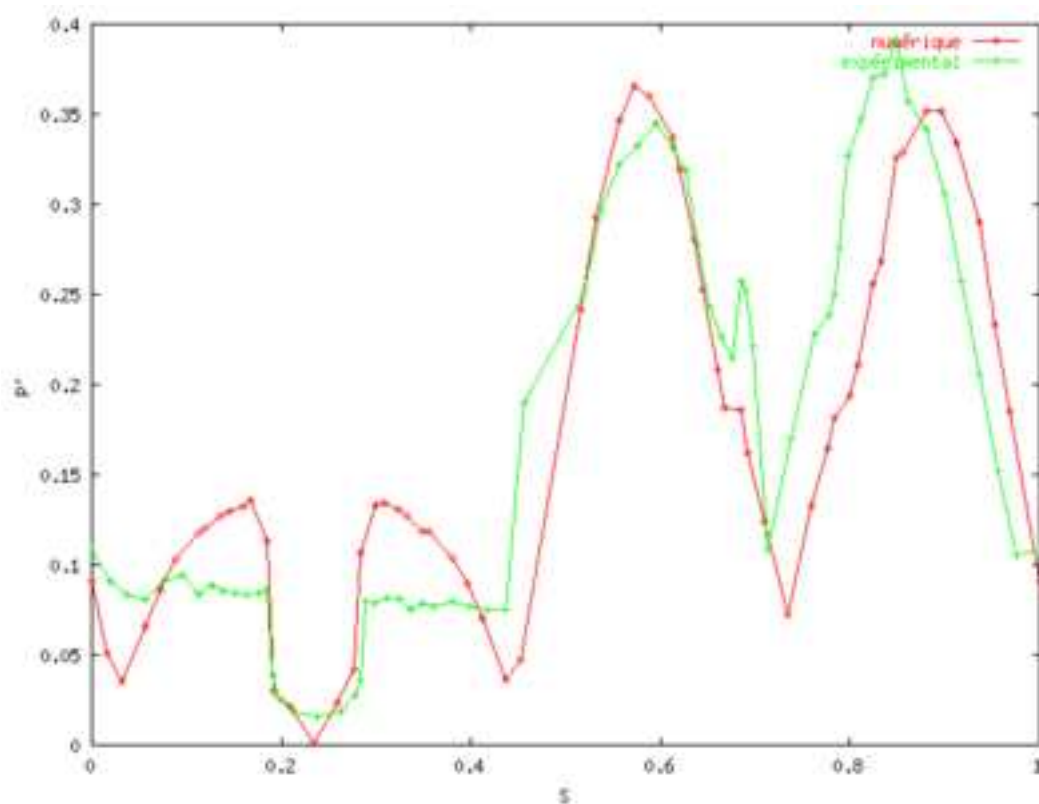
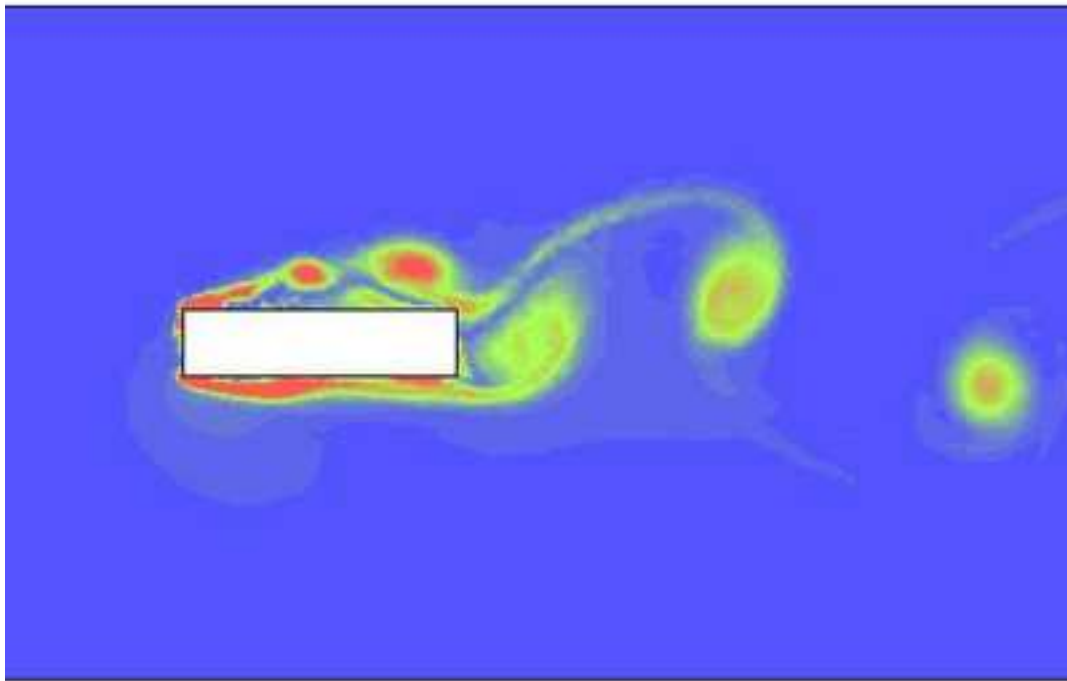


FIG. 8 – Profil de l'écart-type de pression

FIG. 9 – *Vorticité autour du profil.*

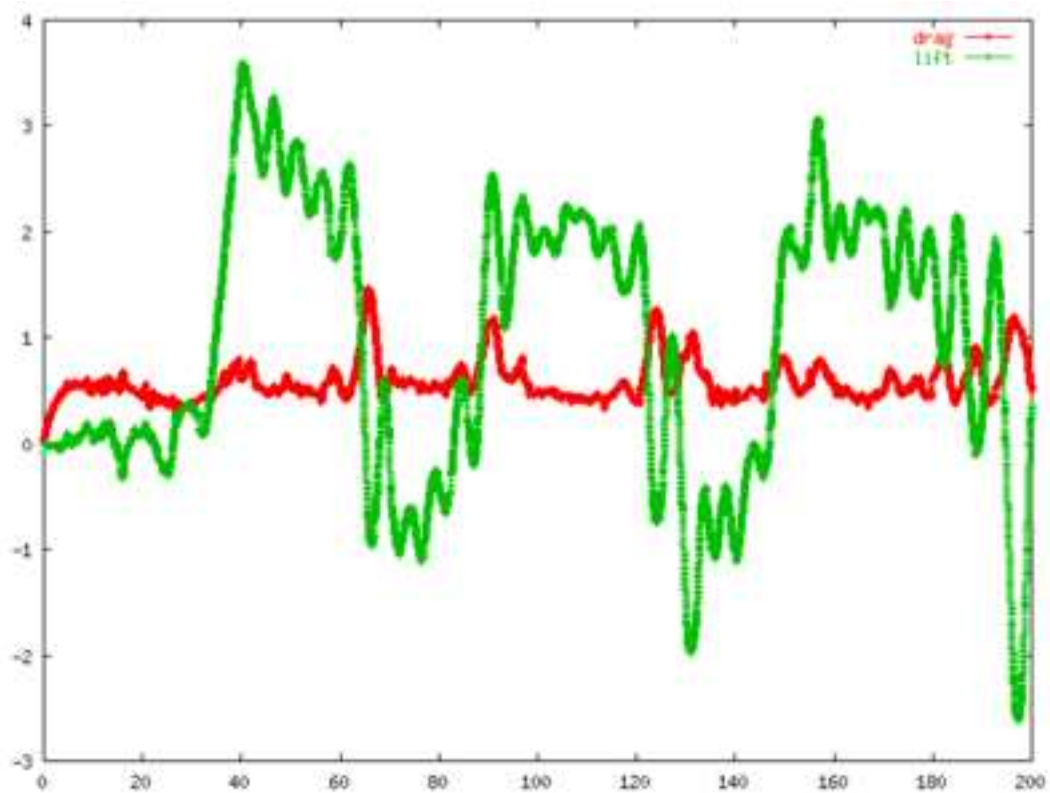
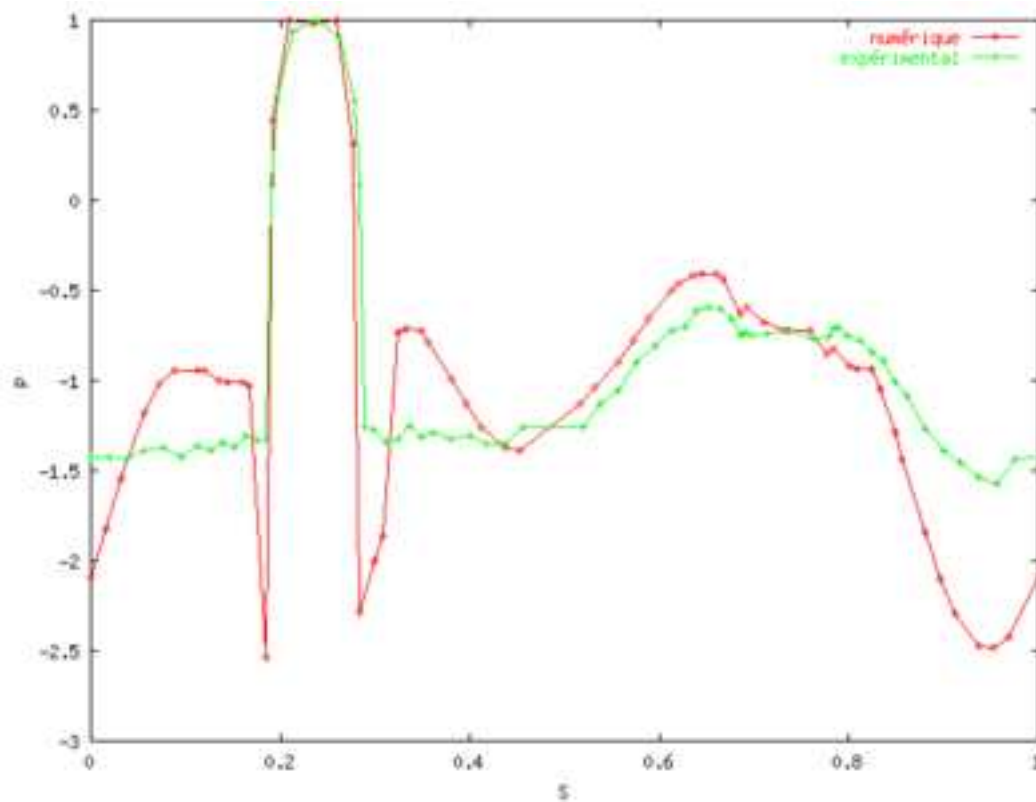


FIG. 10 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 11 – *Profil de pression*

## 2.3 Maillage M1-250

Nombre de sommets	19744
Nombre de points sur la structure	500
Raffinement sur la paroi	Isotrope
Nombre de couches structurées à la paroi	0
$y+$ moyen du premier point	250

### 2.3.1 Simulation DT0.01-DEL0.01

Turbulence	k-epsilon standard et loi de paroi $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	0.01
Temps total de la simulation	200.

#### Commentaires:

Pas de temps et delta ok mais le plateau de pression en aval des bords d'attaque est trop haut (pb du modèle). Il y a une forte dépression en amont des bords de fuite (accrochage des tourbillons), mais la dissymétrie est moins marquée que pour la simulation sur le maillage M1-125. Ici encore, les variations de pression sont surévaluées.

Des tourbillons se forment au-dessus du profil dans les zones de cisaillement et ont tendance à s'accrocher avant les bords de fuite.

La solution n'est pas périodique et présente des phénomènes basse fréquence (entraînement des tourbillons accrochés au profil). Strouhal de l'allée de Von Karman : 0.11.

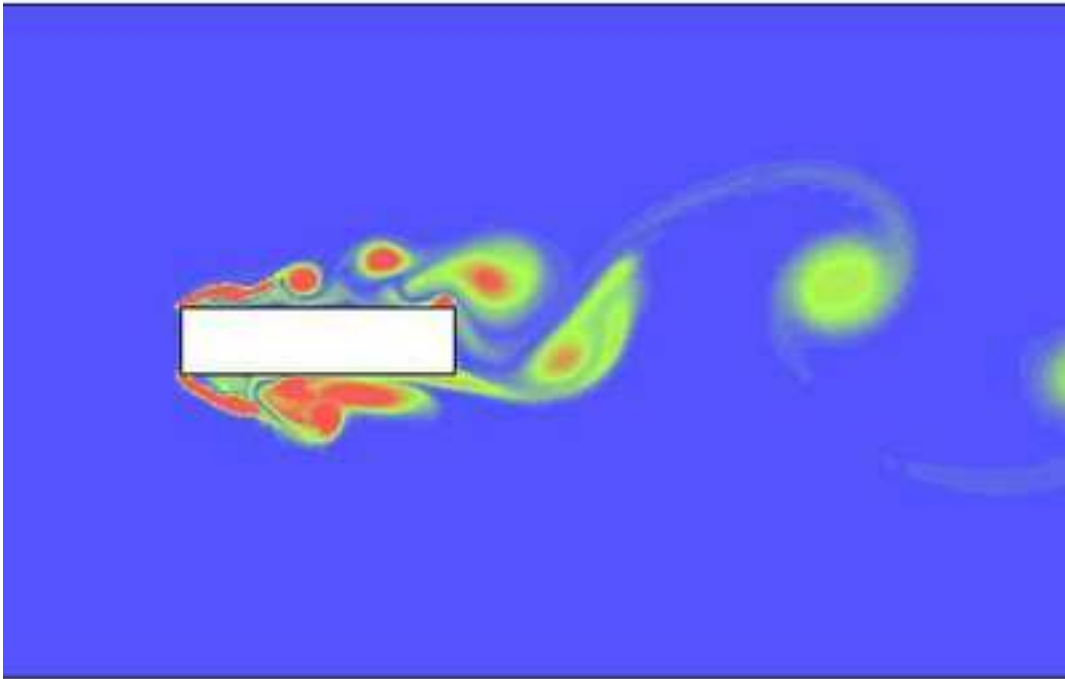


FIG. 12 – *Vorticité autour du profil.*

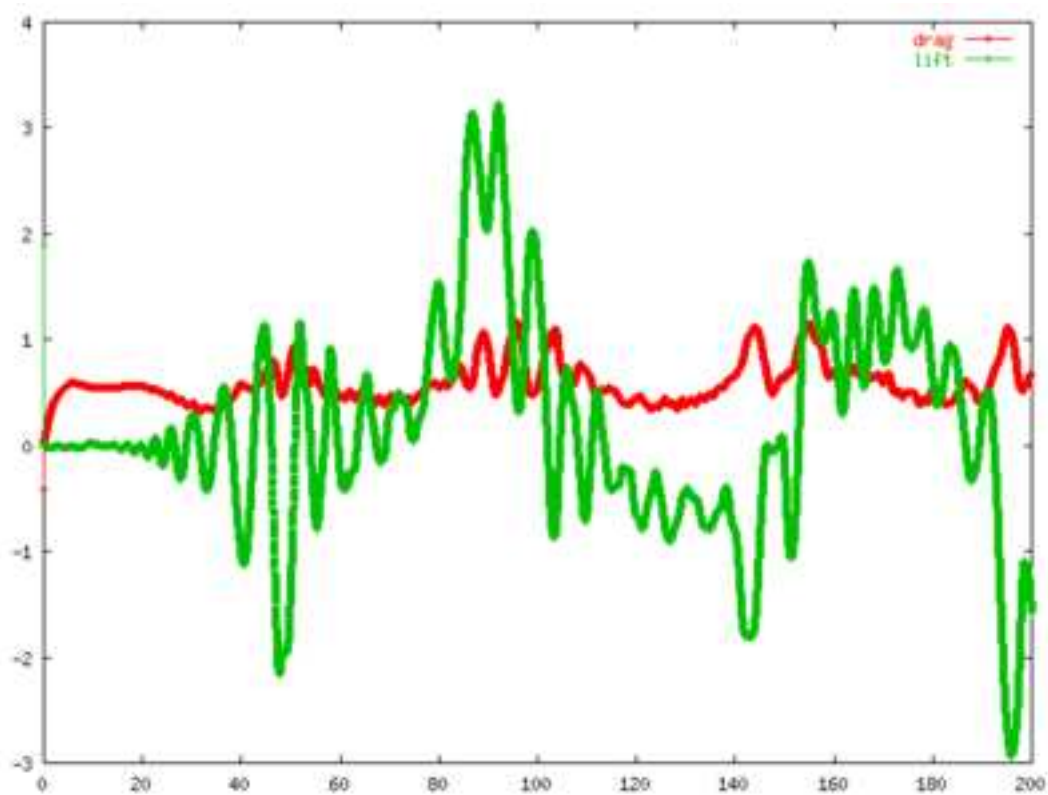
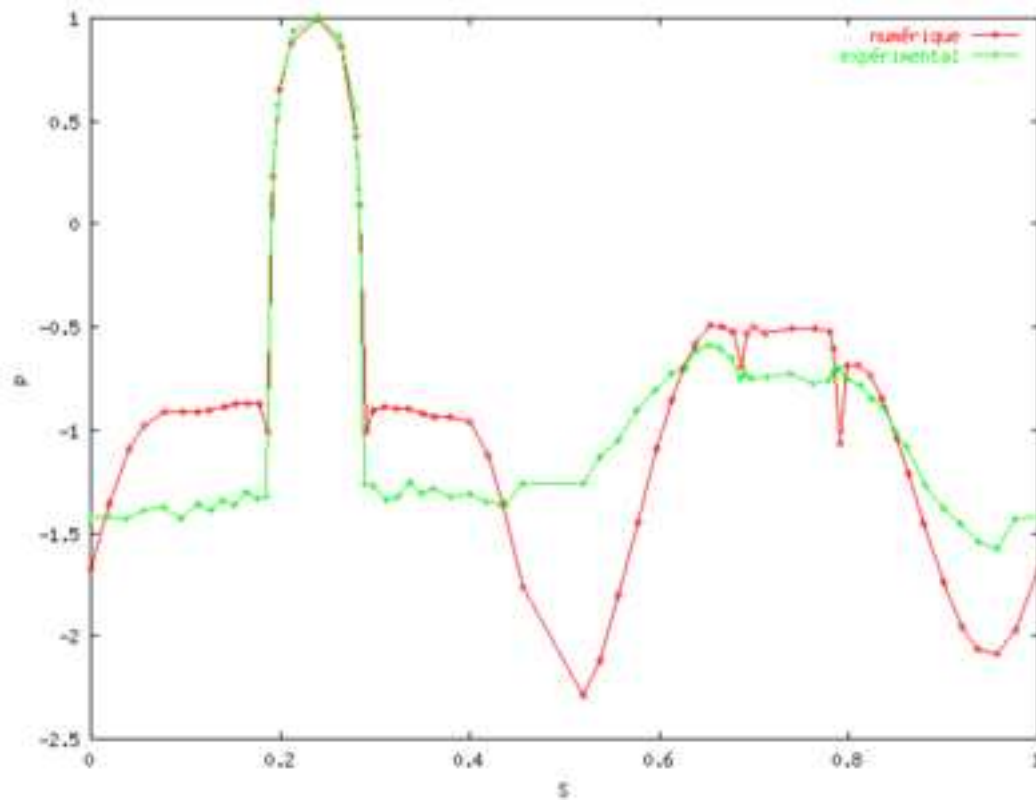


FIG. 13 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 14 – *Profil de pression*



## 2.4 Maillage SYM-125

Nombre de sommets	8424
Nombre de points sur la structure	260
Raffinement sur la paroi	Isotrope
Nombre de couches structurées à la paroi	0
$y+$ moyen du premier point	300

### 2.4.1 Simulation DT0.02-DEL0.01

Turbulence	k-epsilon standard et loi de paroi $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.02
Delta de la loi de paroi	0.01
Temps total de la simulation	200.

#### Commentaires:

Cette simulation est très semblable à celle sur le maillage M1-125. On constate pourtant que la fréquence entraînement des tourbillons accrochés est plus basse. Avec un fenêtrage approprié on arrive à avoir une plus grande symétrie du profil de pression.

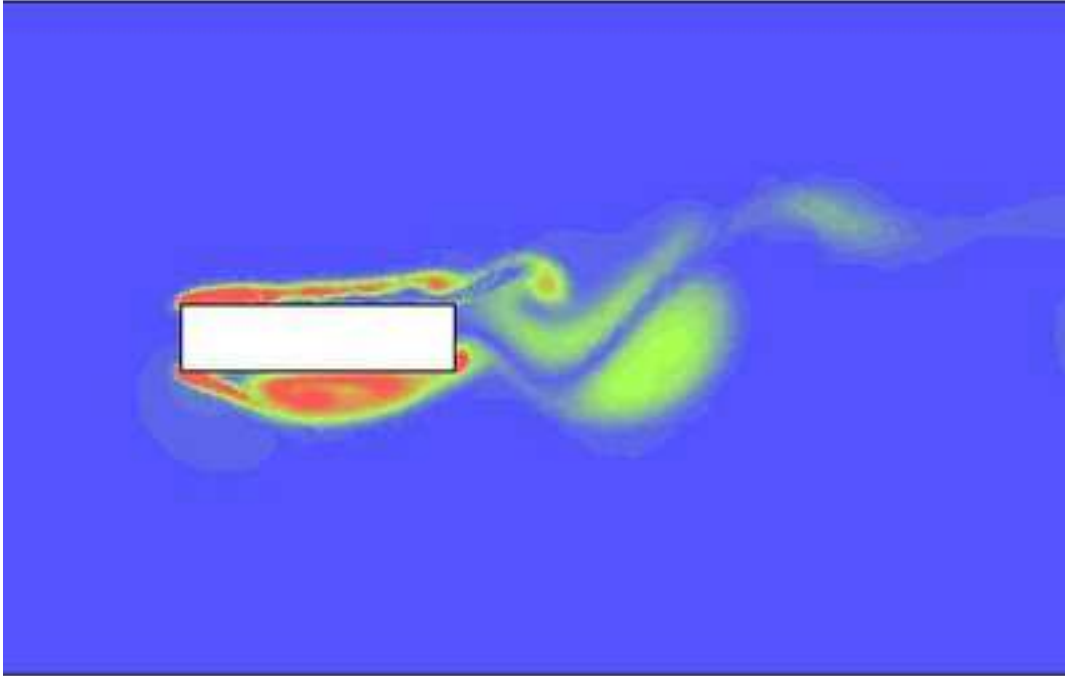


FIG. 15 – *Vorticité autour du profil.*

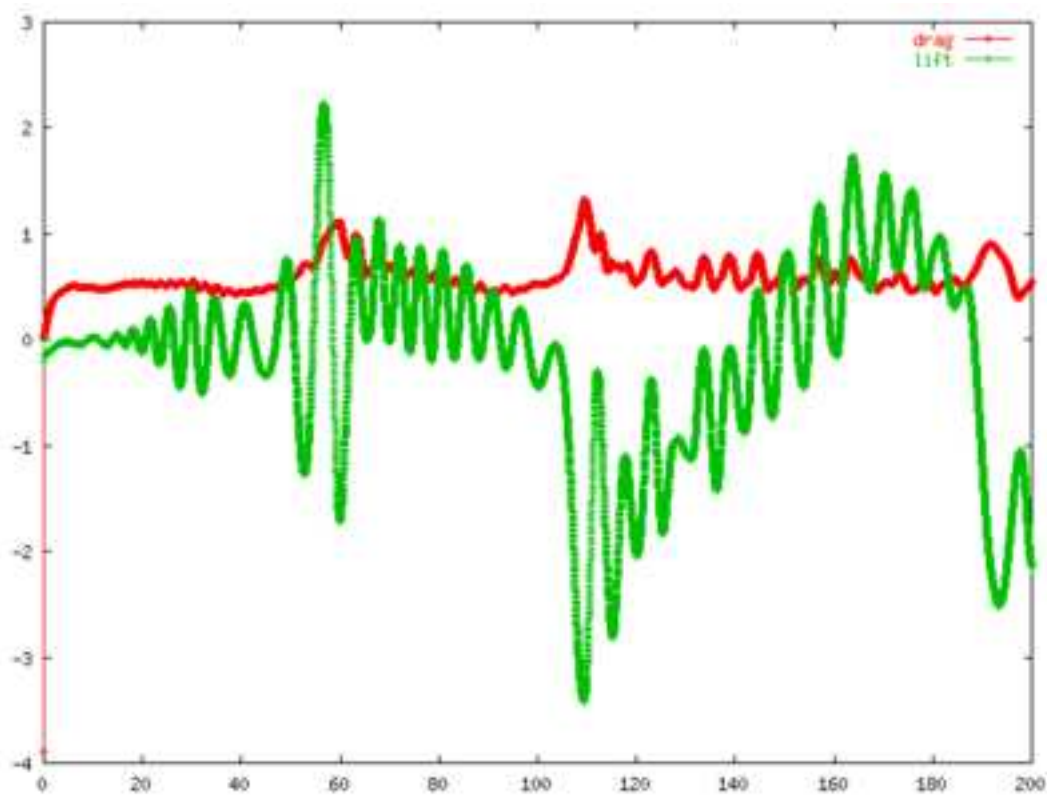
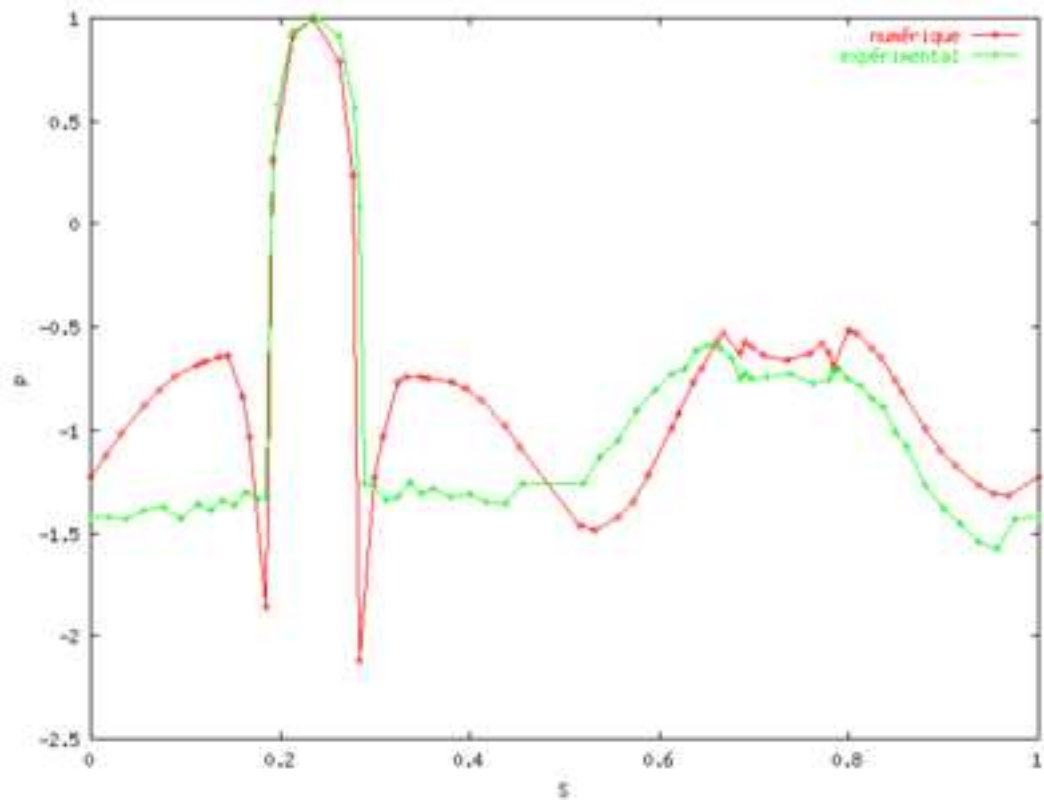


FIG. 16 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 17 – *Profil de pression*

## 2.5 Maillage SYM-250

Nombre de sommets	21600
Nombre de points sur la structure	512
Raffinement sur la paroi	Isotrope
Nombre de couches structurées à la paroi	0
$y+$ moyen du premier point	250

### 2.5.1 Simulation DT0.01-DEL0.01

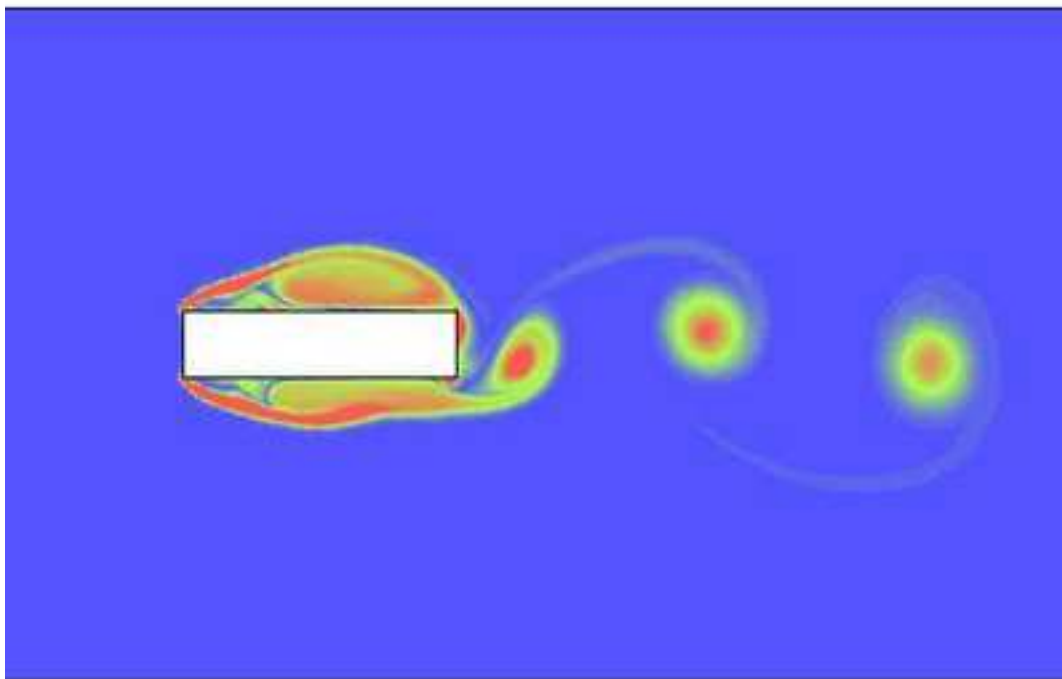
Turbulence	k-epsilon standard et loi de paroi $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	0.01
Temps total de la simulation	200.

#### Commentaires:

C'est sur cette simulation qu'on voit la plus grande différence avec un maillage asymétrique (voir 2.3.1). Ici on passe à une solution périodique et symétrique. Les tourbillons sont toujours accrochés sur le profil mais ils ne sont plus arrachés. Ceci montre qu'une très légère différence dans l'évaluation du cisaillement aux coins amonts aboutit à un grand changement dans la forme de l'écoulement.

### 2.5.2 Simulation DT0.01-DEL0.01-Tu0.3

Turbulence	k-epsilon standard et loi de paroi $Tu_{inflow} = 0.3\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	0.01
Temps total de la simulation	200.

FIG. 18 – *Vorticité autour du profil.***Commentaires:**

Ici on a voulu voir l'influence du niveau de turbulence injectée en entrée. En passant de 1% à 0.3% le principal effet est de diminuer le niveau de viscosité turbulente de l'écoulement et donc d'augmenter le Reynolds réel. L'effet est loin d'être négligeable puisque qu'on retrouve la non-périodicité due à l'arrachement des tourbillons accrochés au profil et la légère dissymétrie qui en découle. Cette simulation reproduit celle du maillage M1-250 (voir 2.3.1).

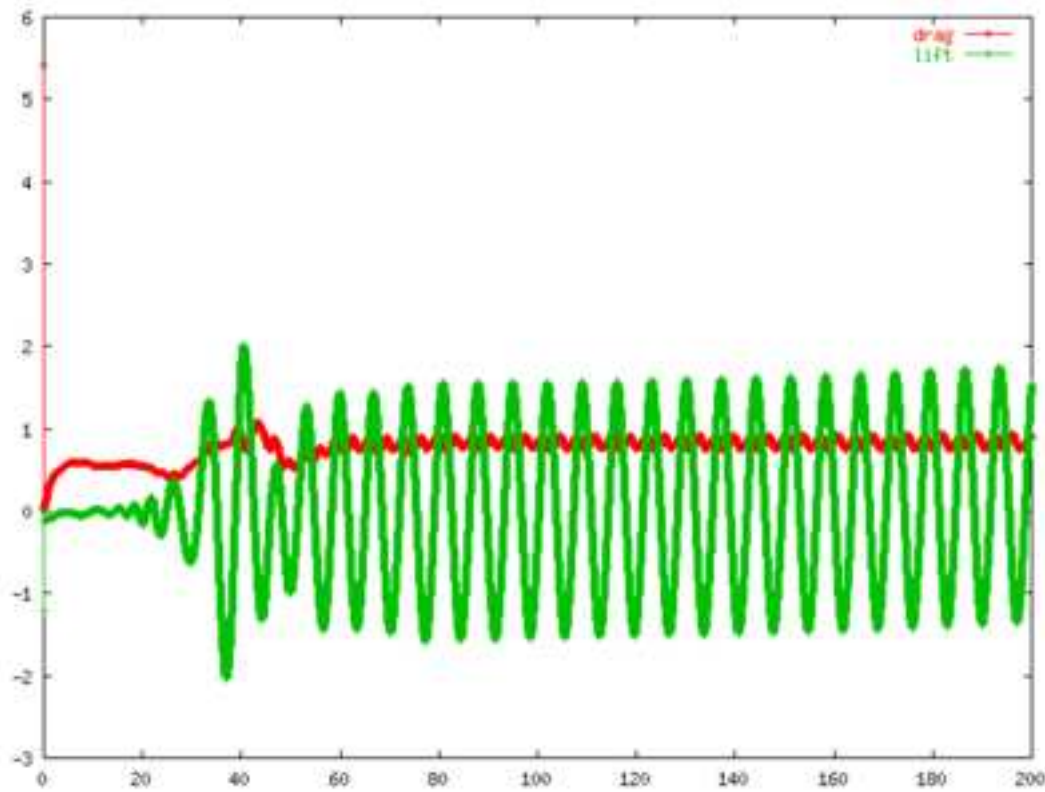


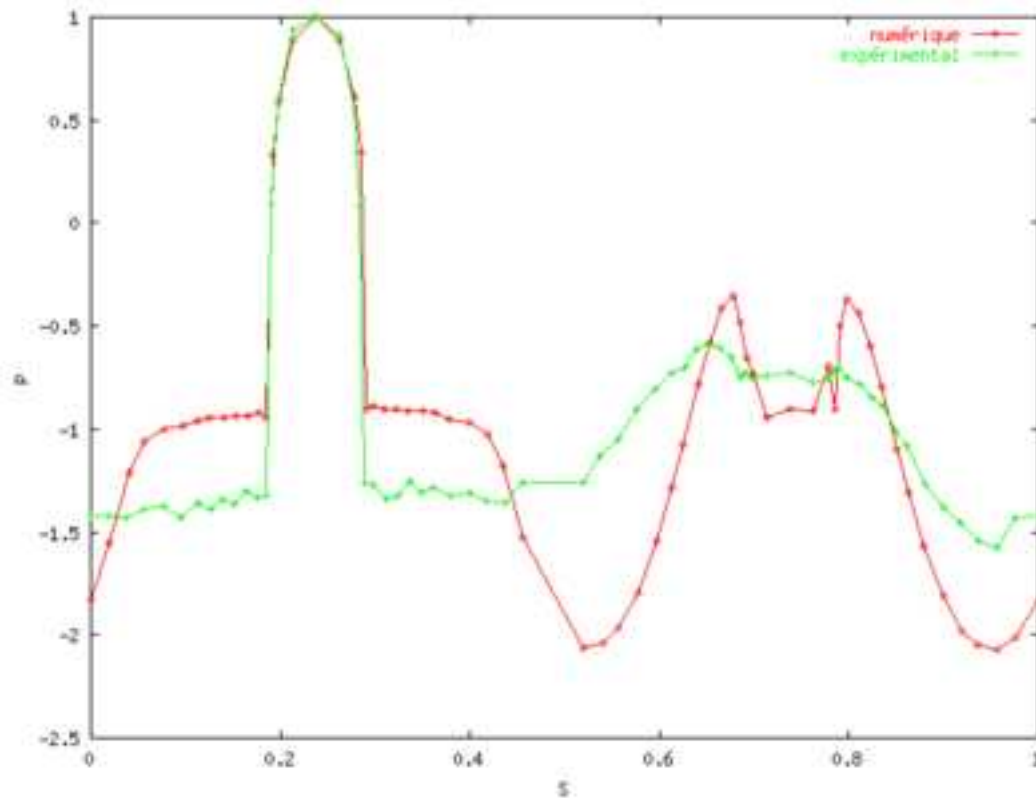
FIG. 19 – Évolution de la traînée et de la portance

### 2.5.3 Simulation PAS-DE-PAROI-DT0.01

Turbulence	k-epsilon standard et loi de paroi $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	-
Temps total de la simulation	200.

#### Commentaires:

Ici on supprime la loi de paroi. La conséquence est que les tourbillons ne se forment plus et que les variations de pression sont amorties. On voit aussi

FIG. 20 – *Profil de pression*

qu'à cause de la grande symétrie de la simulation, l'allée de Von Karman met beaucoup de temps à s'établir.

Manifestement ce modèle ne décrit pas correctement le cisaillement à la paroi.



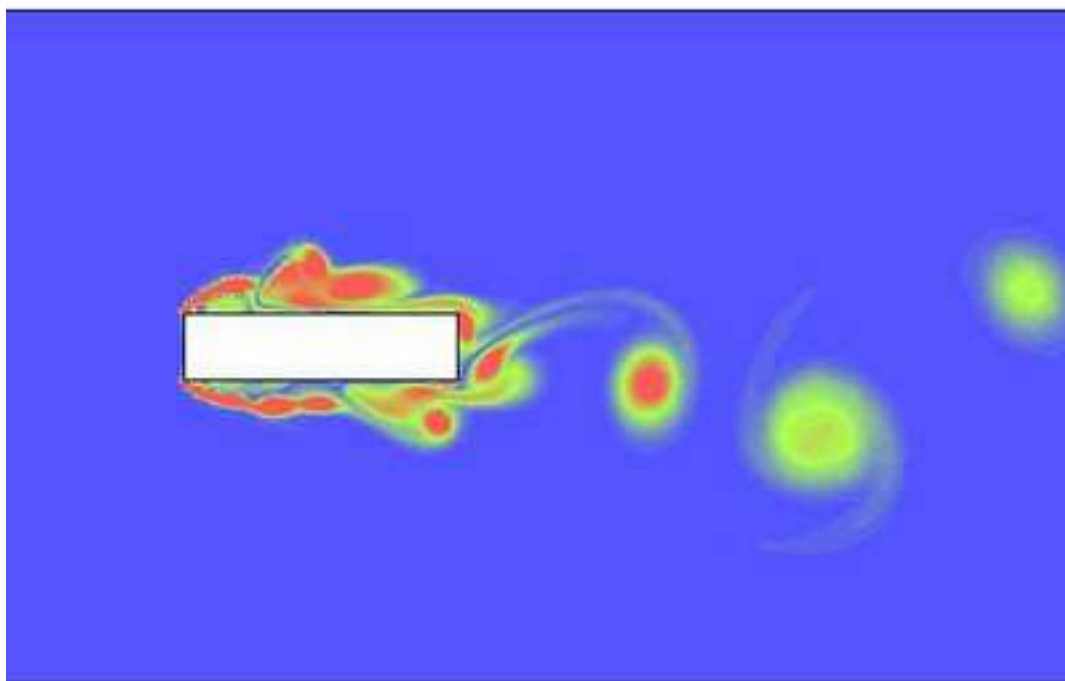


FIG. 21 – *Vorticité autour du profil.*

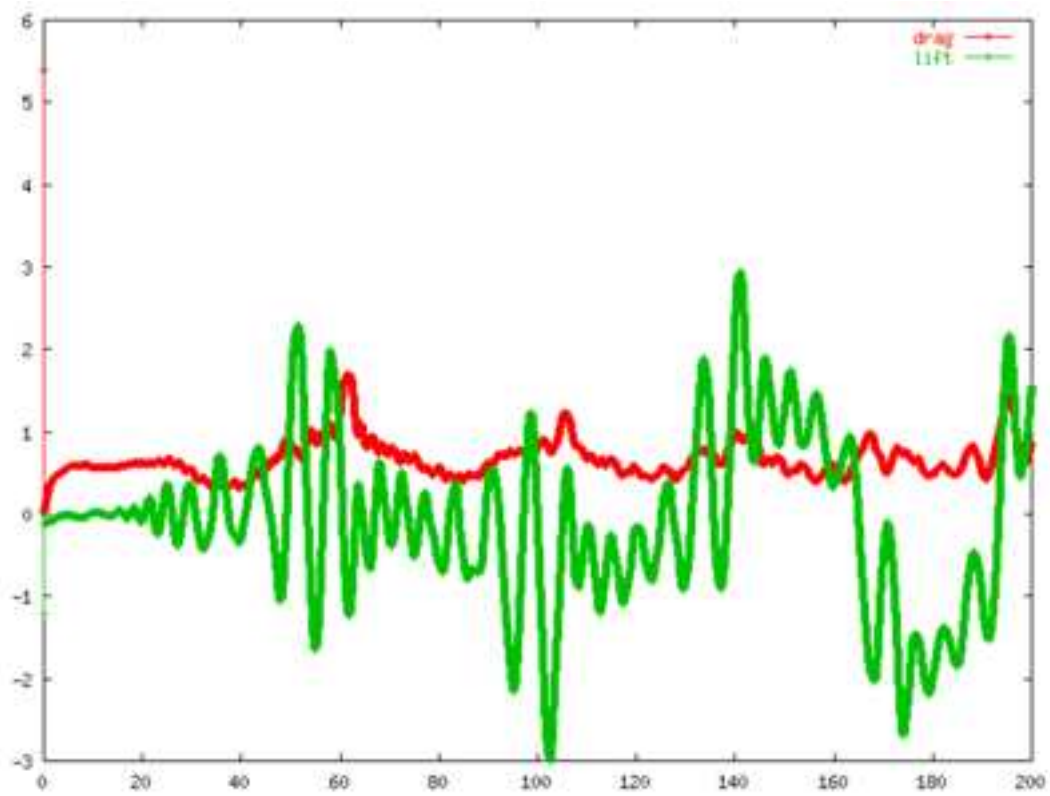
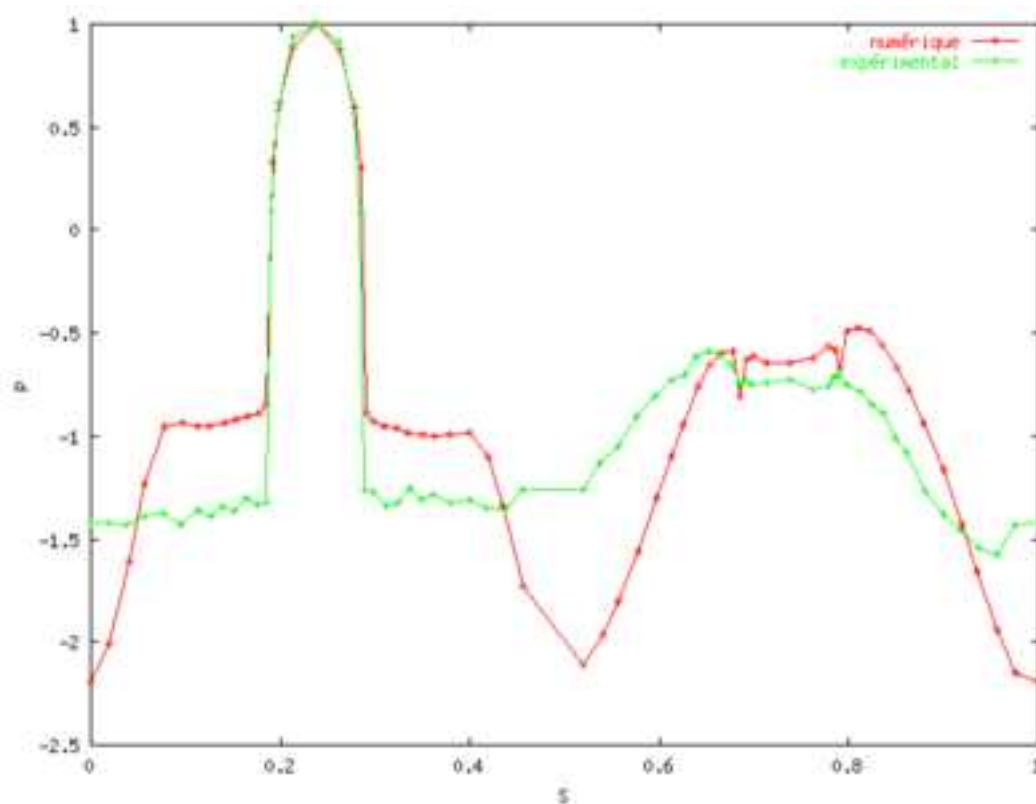


FIG. 22 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 23 – *Profil de pression*

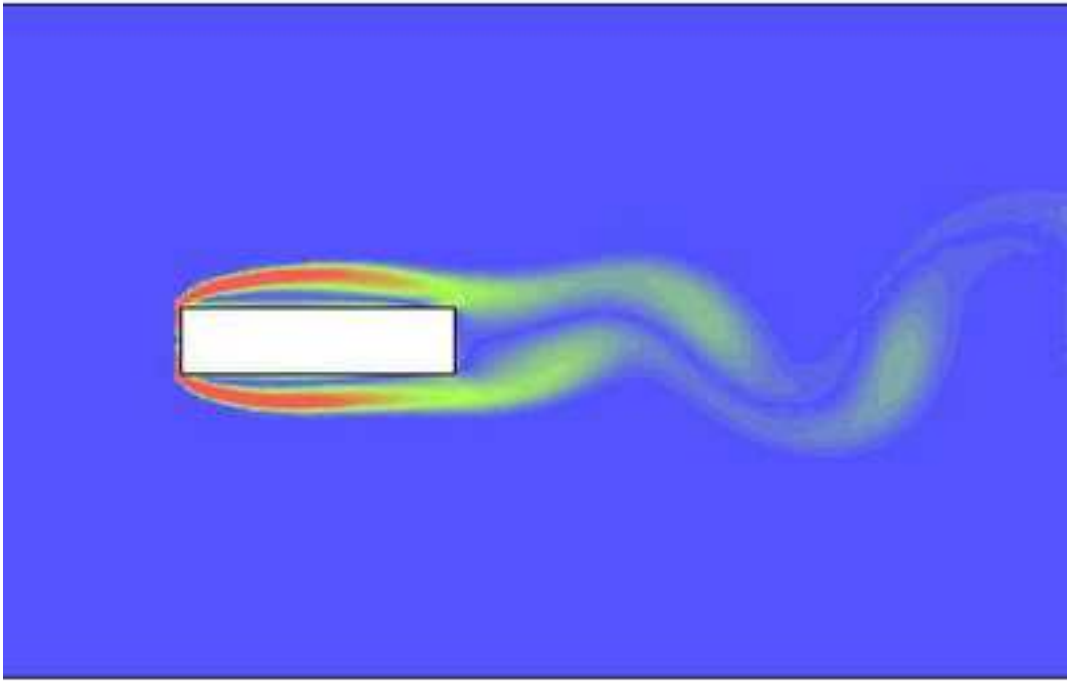


FIG. 24 – *Vorticité autour du profil.*

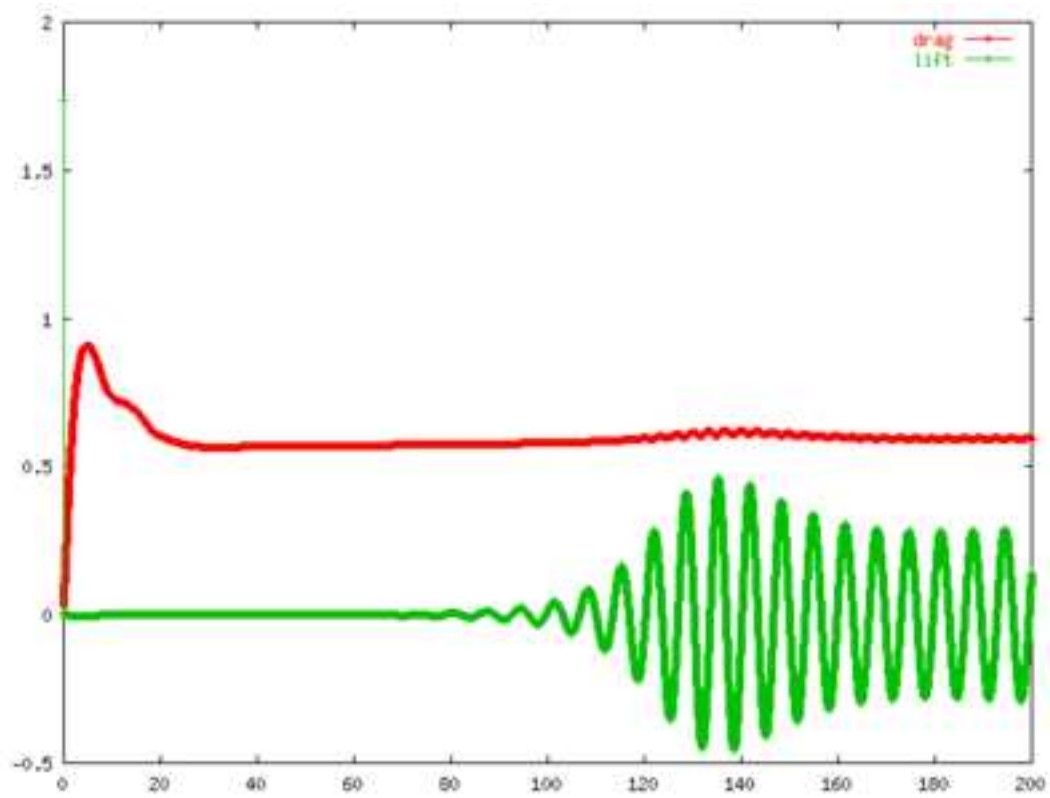
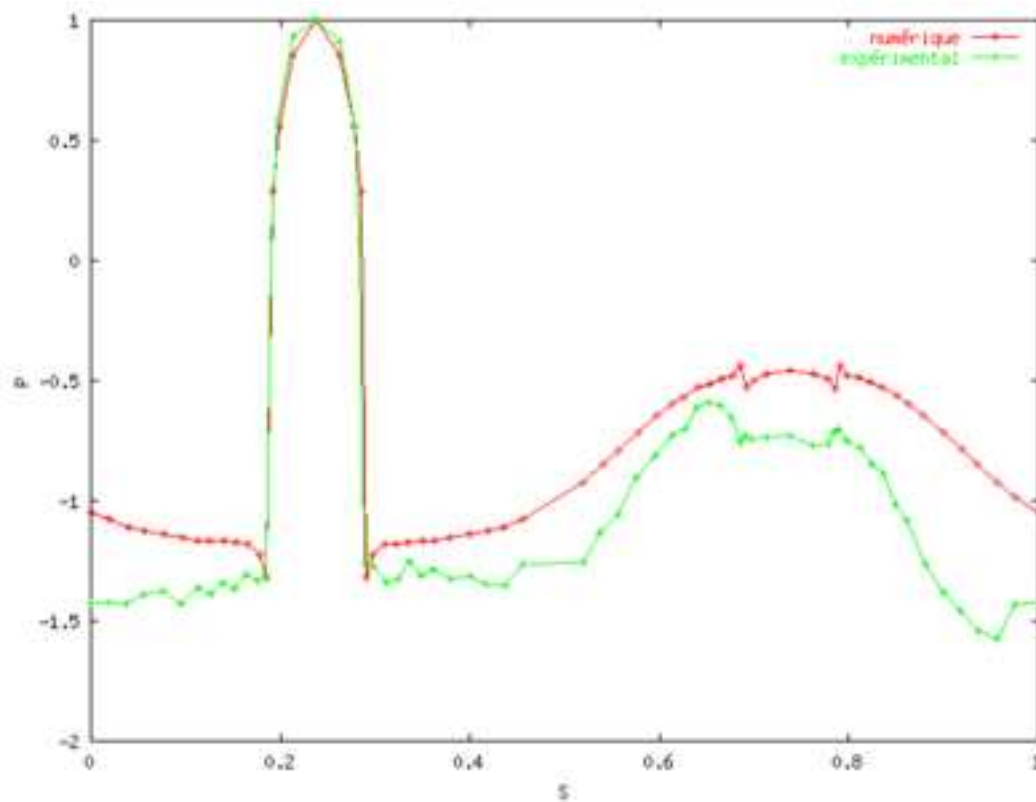


FIG. 25 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 26 – *Profil de pression*

## 2.6 Maillage SYM-500

Nombre de sommets	49836
Nombre de points sur la structure	1000
Raffinement sur la paroi	Isotrope
Nombre de couches structurées à la paroi	0
$y+$ moyen du premier point	250

### 2.6.1 Simulation DT0.01-DEL0.01

Turbulence	k-epsilon standard et loi de paroi $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.005
Delta de la loi de paroi	0.01
Temps total de la simulation	183.

#### Commentaires:

Le pas de temps semble bon mais il n'y a pas d'amélioration par rapport au maillage SYM-250 (voir 2.5.1). La solution est presque identique mais le coût du calcul a explosé (8 jours sur un P4 à 2Ghz).

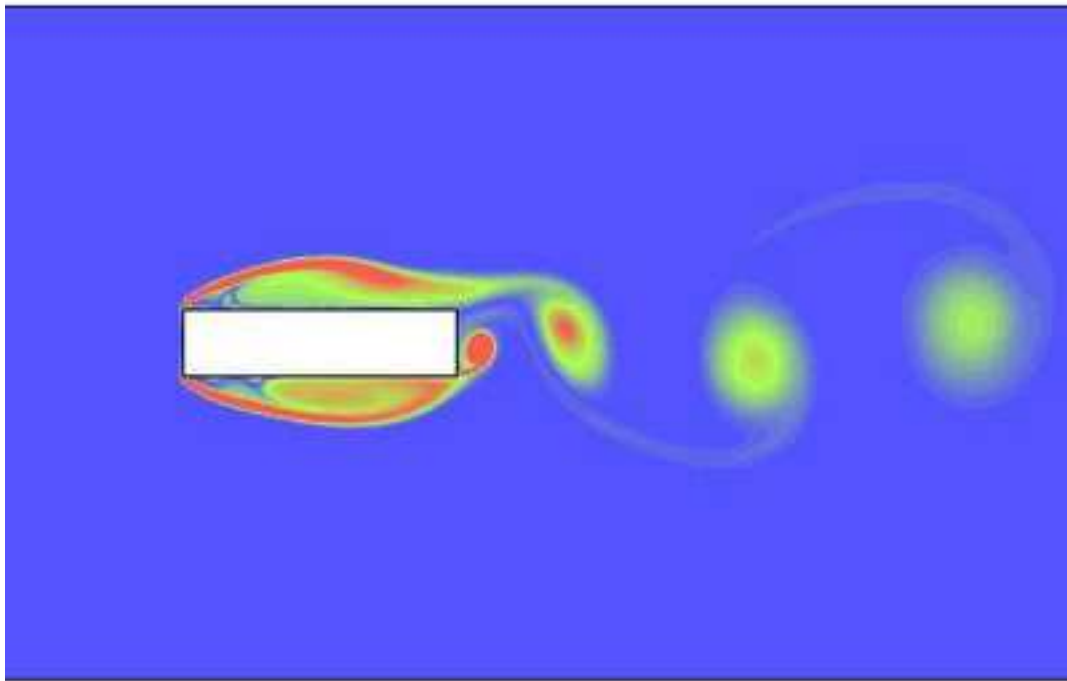


FIG. 27 – *Vorticité autour du profil.*



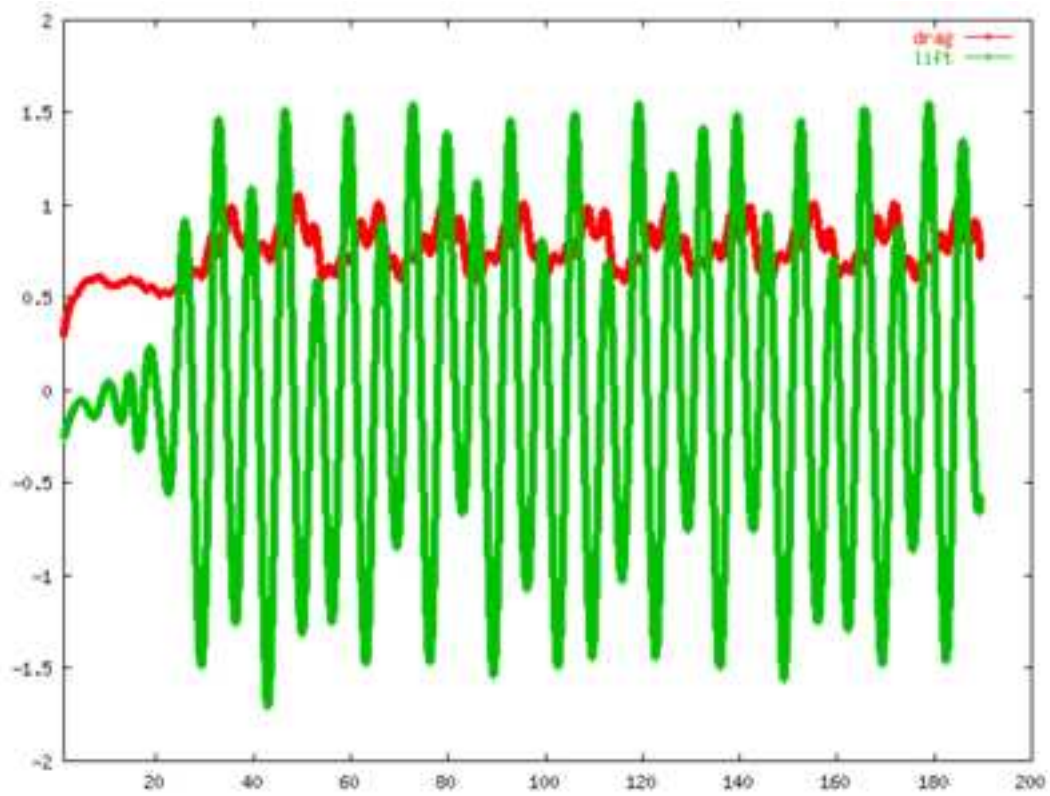
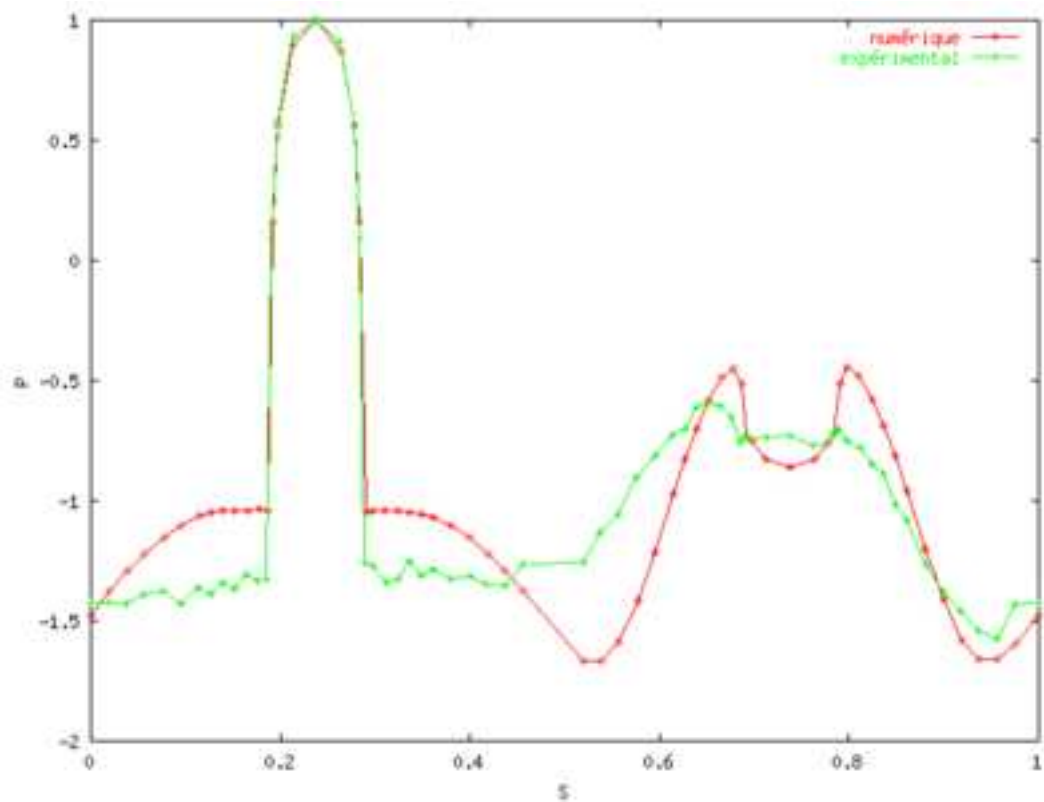


FIG. 28 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 29 – *Profil de pression*

## 2.7 Maillage SYM-250-B2-Y5

Nombre de sommets	22624
Nombre de points sur la structure	512
Raffinement sur la paroi	Isotrope
# couches structurées à la paroi	2
$y_+$ moyen du premier point	5

### 2.7.1 Simulation DT0.01-NC3

Turbulence	k-epsilon bicouche (k-l et standard) $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	-
# couches zone proche-paroi	3
Reynolds limite zone proche-paroi	$10^5$
Temps total de la simulation	200.

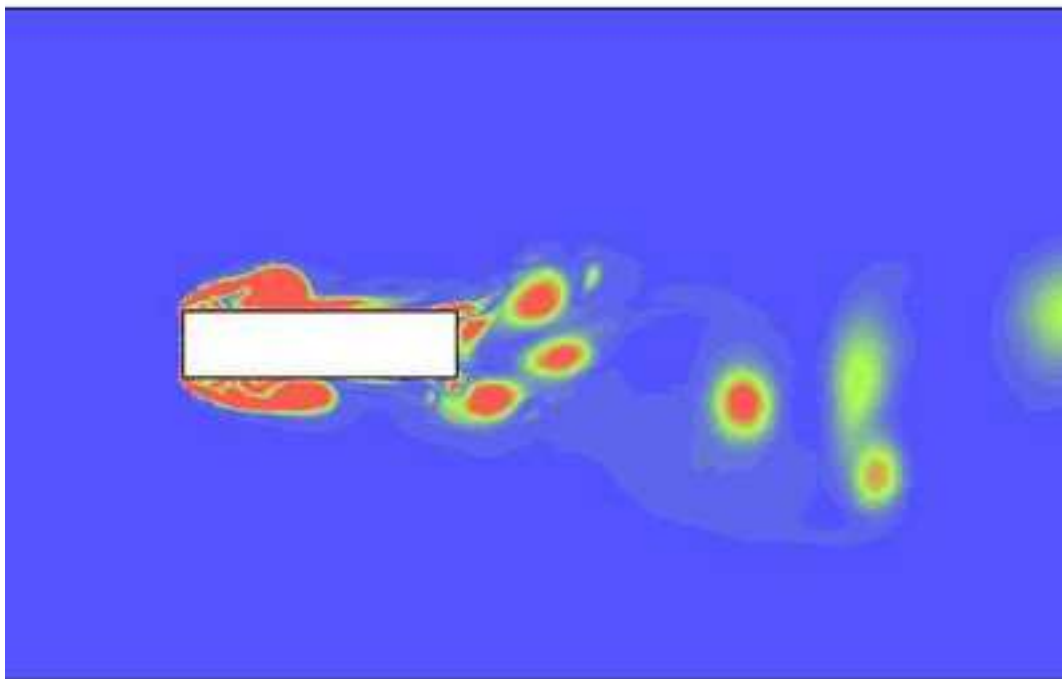
#### Commentaires:

Ici on a changé de modèle en espérant mieux décrire les zones de cisaillements aux coins et sur le profil. Le modèle est bi-couche c'est à dire que près de la paroi (zone 1) on utilise un modèle à une équation (k est calculé jusqu'à la paroi) et la longueur de mélange est donné par une formule algébrique. Dans la zone 2 on utilise un modèle k-epsilon standard.

Pour délimiter les deux zones on utilise deux critères. Le premier donne le nombre de couche maximum de la première couche (ici on a pris  $nc=3$ ). Le second donne le nombre de Reynolds limite de la première couche (basé sur la distance à la paroi), ici on pris  $1.e5$ . C'est donc le premier critère qui limite vraiment.

Pour que ce modèle fonctionne il est nécessaire que le premier point soit très proche de la paroi ( $y_+ < 5$ ). Pour ce faire, les maillages ont été raffinés à la paroi. Ici on a 2 couches supplémentaires avec la première à  $y_+ = 5$ .

Le résultat est le meilleur obtenu jusqu'à présent. La solution est non-périodique mais il n'y a pas de basses fréquences. En effet il n'y a pas d'accro-

FIG. 30 – *Vorticité autour du profil.*

chage de tourbillons et ceux-ci apparaissent beaucoup plus tôt dans la zone de cisaillement amont. Cela conduit à la présence d'un vrai plateau de pression sur le profil, de plus avec le bon niveau.

Petit bémol les variations de pression semblent surévaluées mais comme on l'a dit en introduction, les mesures expérimentales de cette grandeur nous semble sujettes à caution.

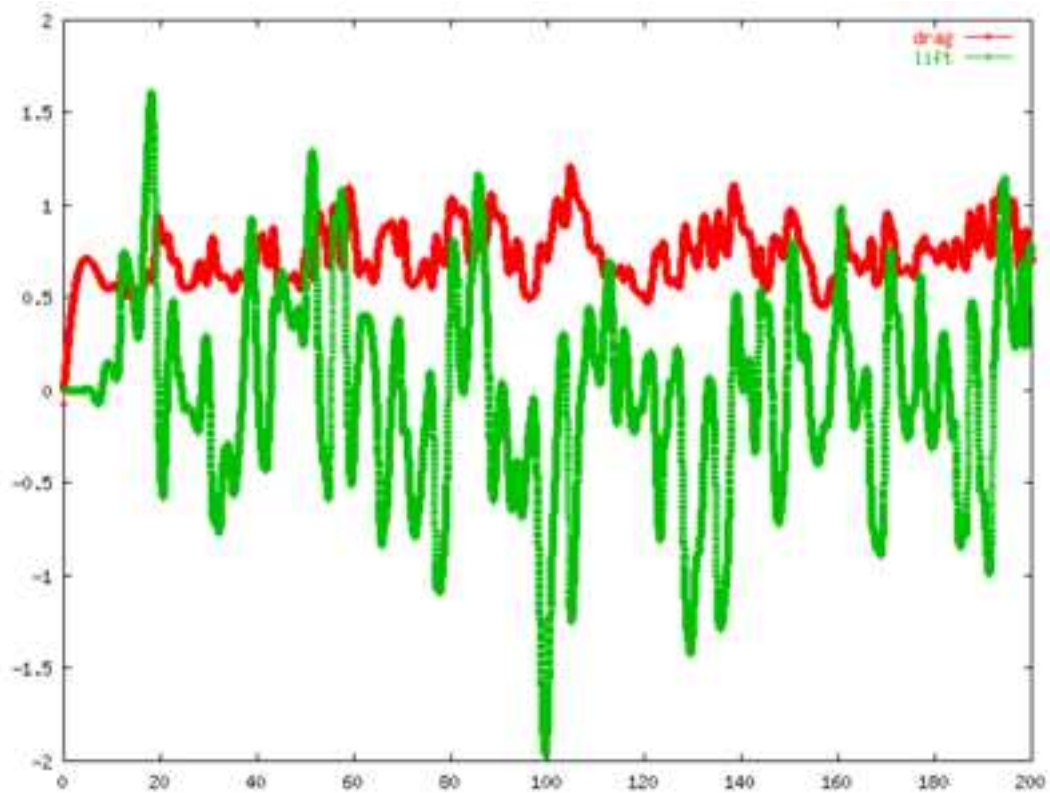
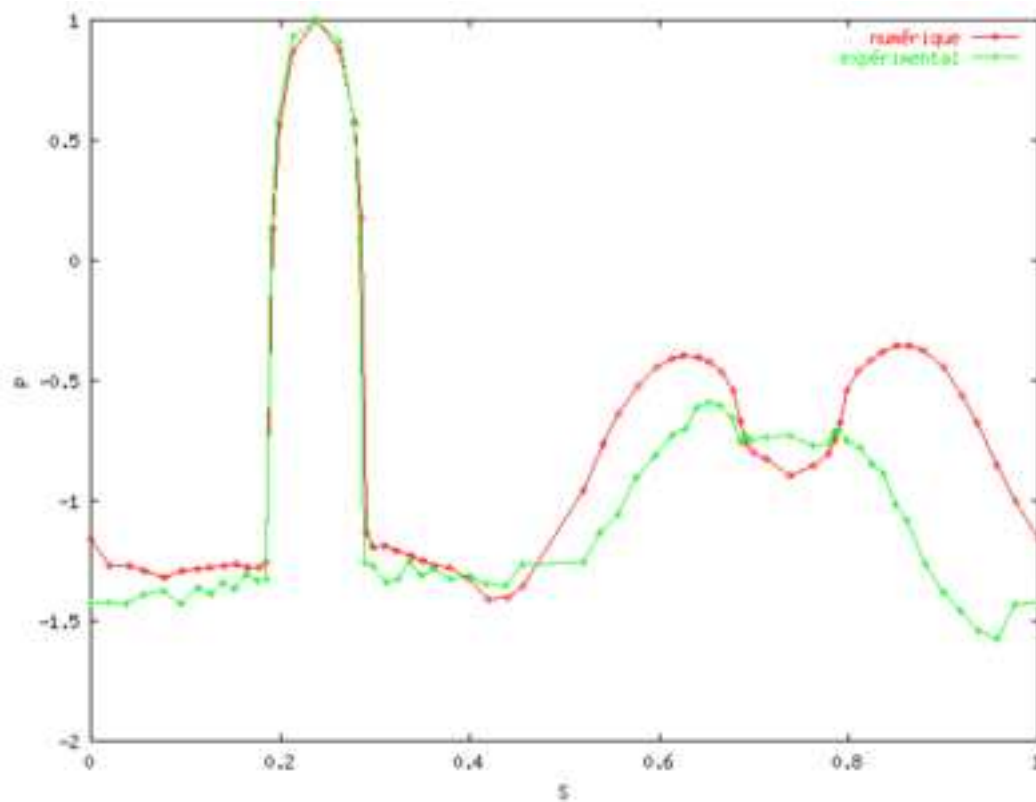
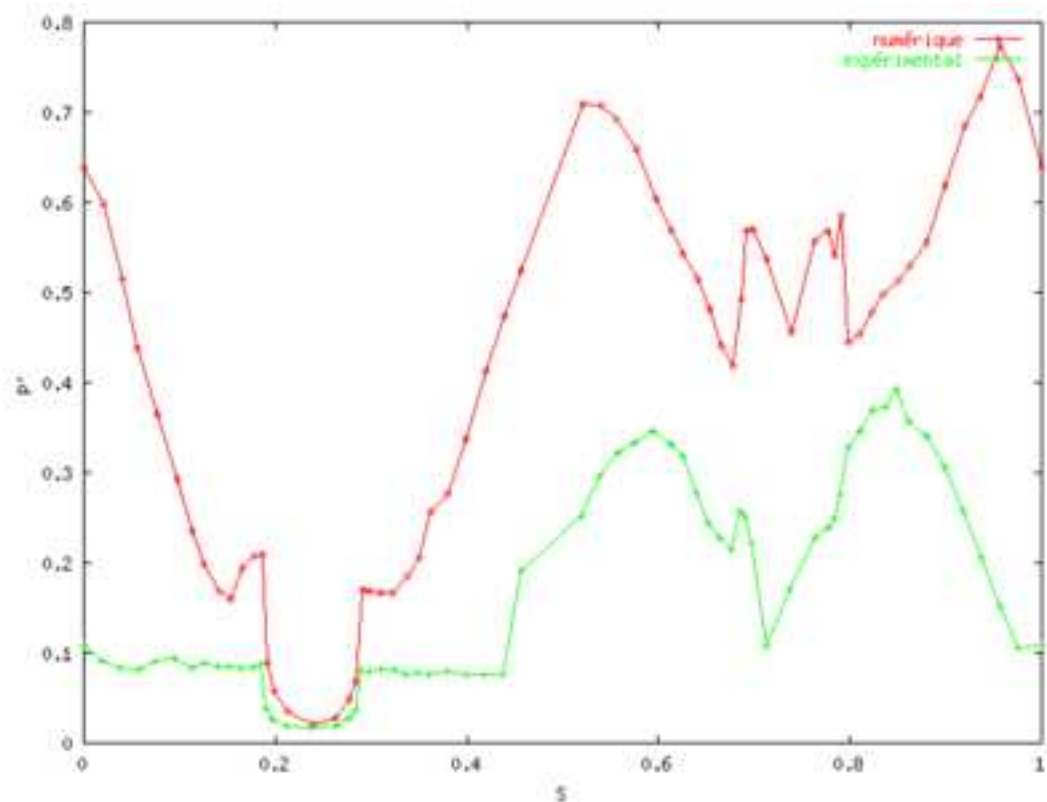


FIG. 31 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 32 – *Profil de pression*

FIG. 33 – *Profil de pression*

## 2.8 Maillage SYM-250-B7-Y2

Nombre de sommets	25184
Nombre de points sur la structure	512
Raffinement sur la paroi	Isotrope
# couches structurées à la paroi	7
$y_+$ moyen du premier point	2

### 2.8.1 Simulation DT0.01-NC16

Turbulence	k-epsilon bicouche (k-l et standard) $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	-
# couches zone proche-paroi	16
Reynolds limite zone proche-paroi	250
Temps total de la simulation	62(blow!).

#### Commentaires:

On a voulu étudier l'effet du raffinement à la paroi sur les résultats. Au lieu de 2 couches supplémentaires on en a rajouté 7, la première étant à  $y_+ = 2$ .

Pour le modèle bi-couche, la première zone est délimitée par les 16 premières demi-couches et par un Reynolds limite de 250. La simulation a explosé dans le calcul des caractéristiques. On voit ici le problème d'utiliser des mailles très étirées à la paroi avec ce code, les caractéristiques risquant de s'enrouler autour d'un point.



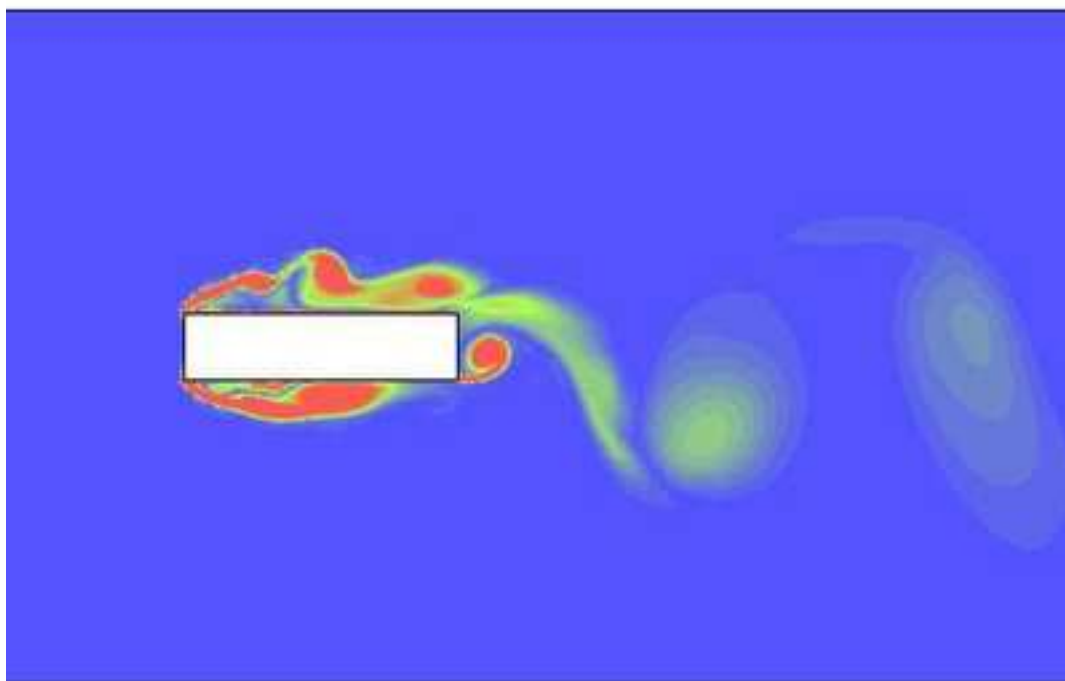


FIG. 34 – *Vorticité autour du profil.*

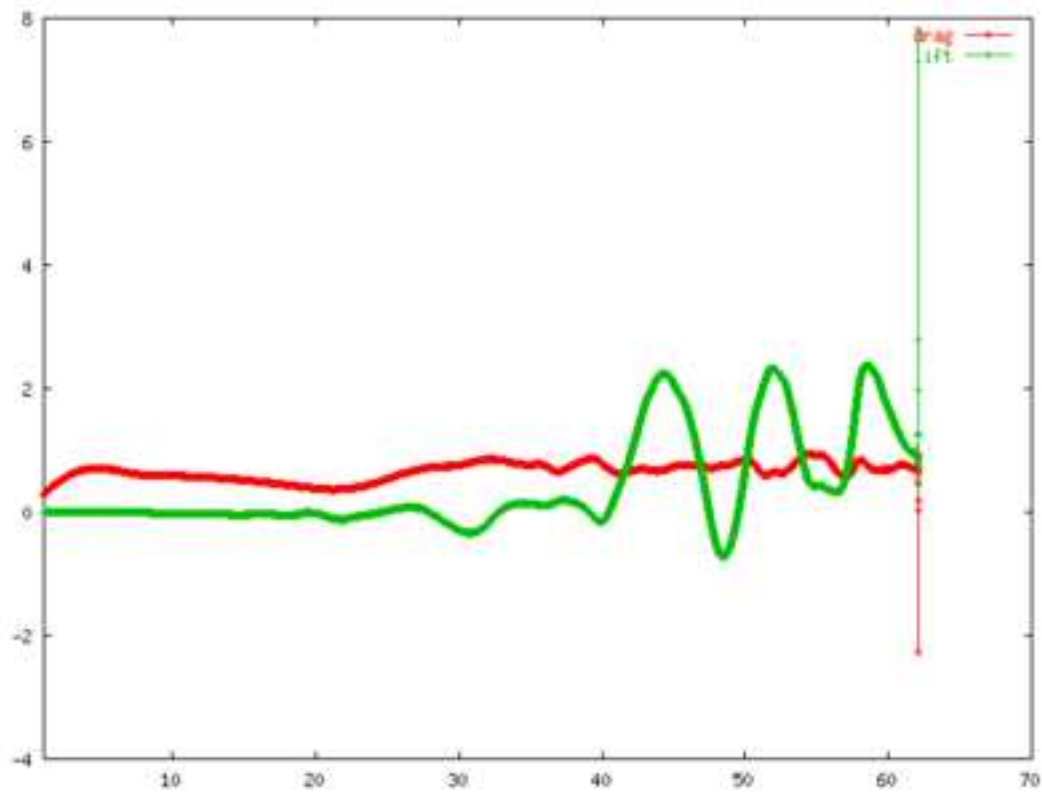
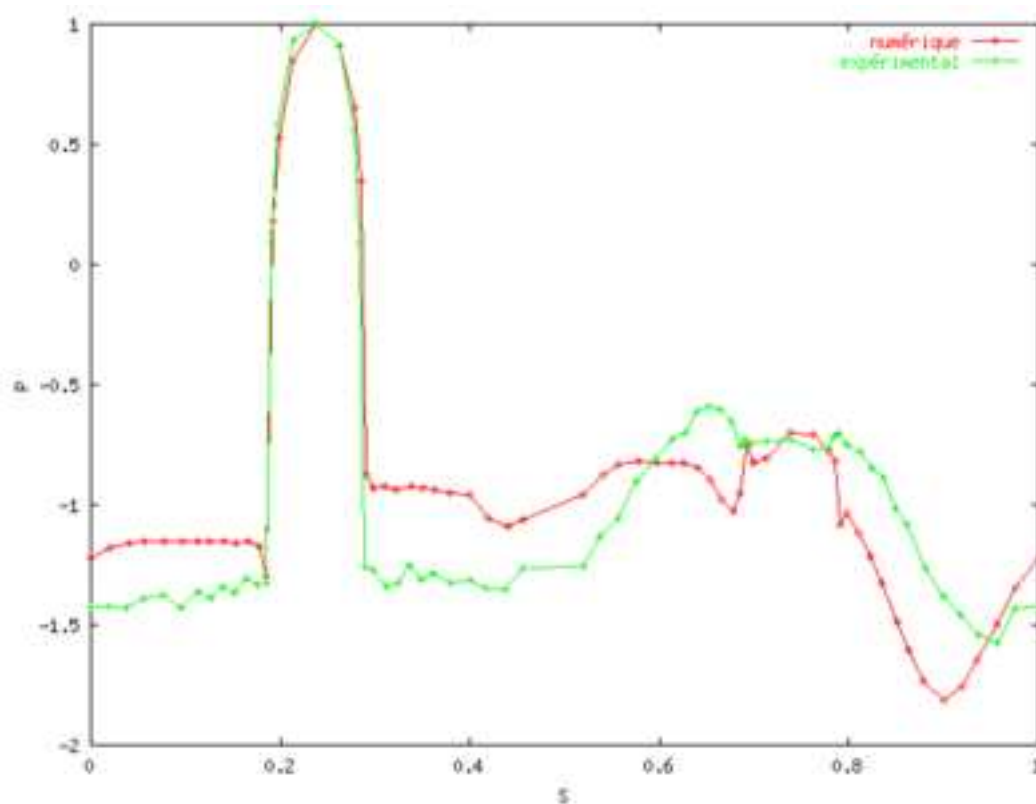


FIG. 35 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 36 – *Profil de pression*

## 2.9 Maillage SYM-178-B2-Y5

Nombre de sommets	11324
Nombre de points sur la structure	356
Raffinement sur la paroi	Aux coins amonts
Nombre de couches structurées à la paroi	2
$y+$ moyen du premier point	5

### 2.9.1 Simulation DT0.01-NC7

Turbulence	k-epsilon bicouche (k-l et standard) $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	-
# couches zone proche-paroi	7
Reynolds limite zone proche-paroi	250
Temps total de la simulation	200.

#### Commentaires:

Le maillage SYM-125 est raffiné à la paroi et aux coins amonts. Le résultat se rapproche de la simulation de référence (voir 2.7.1) mais plateau de pression est toujours trop haut et il y a encore une tendance à accrocher les tourbillons.

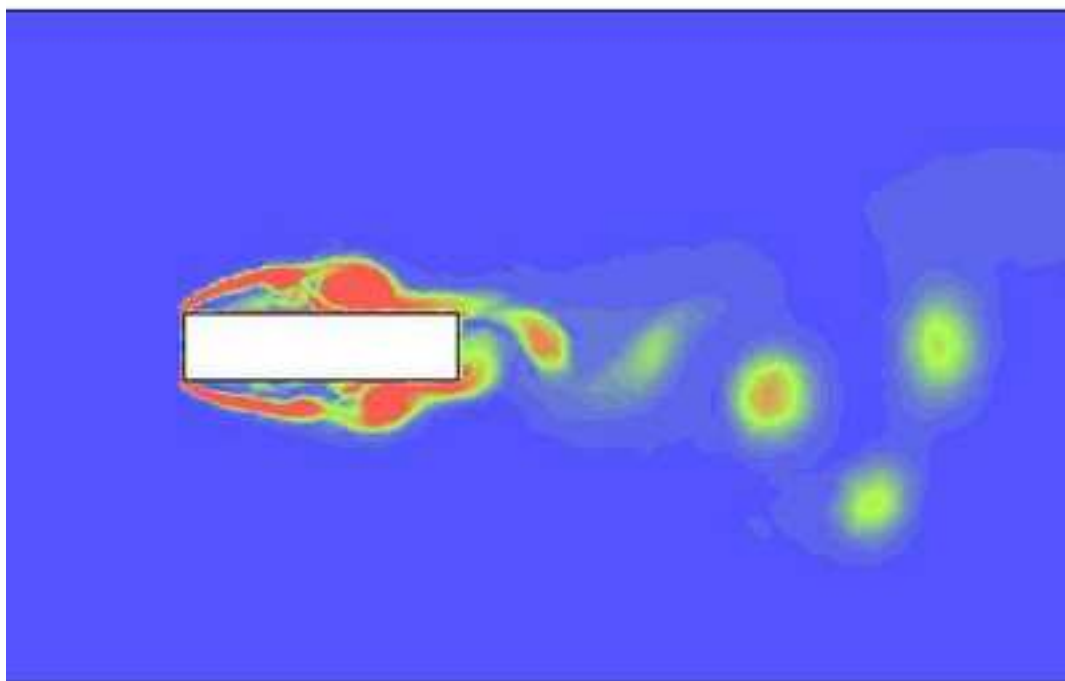


FIG. 37 – *Vorticité autour du profil.*

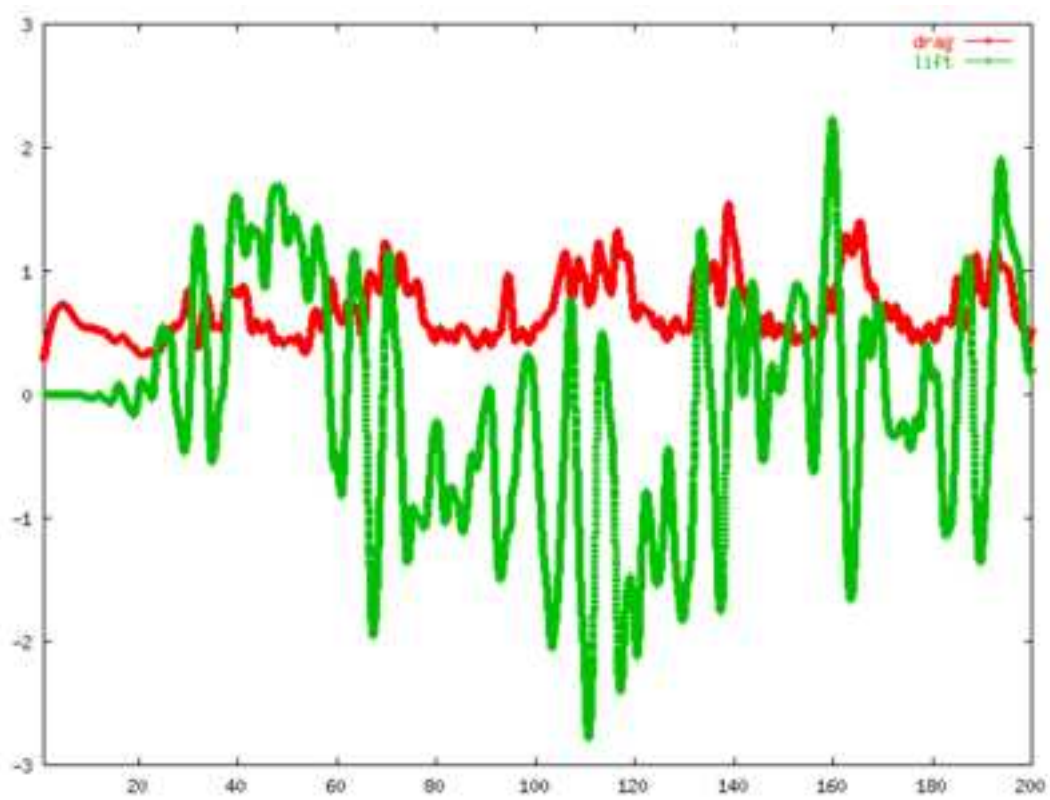
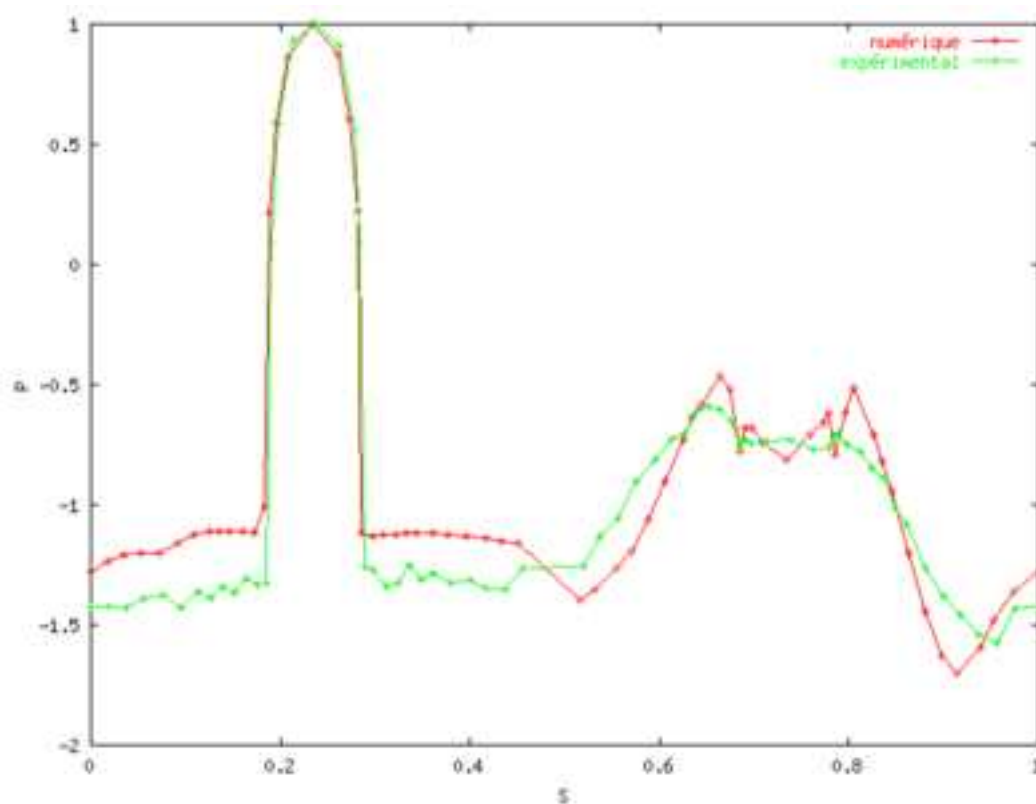


FIG. 38 – Évolution de la traînée et de la portance

FIG. 39 – *Profil de pression*

## 2.10 Maillage SYM-178-B7-Y2

Nombre de sommets	13104
Nombre de points sur la structure	356
Raffinement sur la paroi	Aux coins amonts
Nombre de couches structurées à la paroi	7
$y+$ moyen du premier point	2

### 2.10.1 Simulation DT0.01-NC16

Turbulence	k-epsilon bicouche (k-l et standard) $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	-
# couches zone proche-paroi	16
Reynolds limite zone proche-paroi	250
Temps total de la simulation	365.

#### Commentaires:

Par rapport à la simulation précédente, on rajoute des points près de la paroi. On constate encore un léger accrochage des tourbillons sur le profil mais c'est le plus petit maillage sur lequel on obtient de bons résultats. C'est celui qui sera utilisé pour simuler une oscillation forcée.



FIG. 40 – *Vorticité autour du profil.*

### 2.10.2 Simulation en régime d'oscillation forcée

Turbulence	k-epsilon bicouche (k-l et standard) $Tu_{inflow} = 1\%$
Reynolds	$10^6$
Pas de temps	0.01
Delta de la loi de paroi	-
# couches zone proche-paroi	16
Reynolds limite zone proche-paroi	250
Maillage mobile	Osc. forcée. $\theta_{max} = \pm 1.91deg.$
Temps total de la simulation	700.

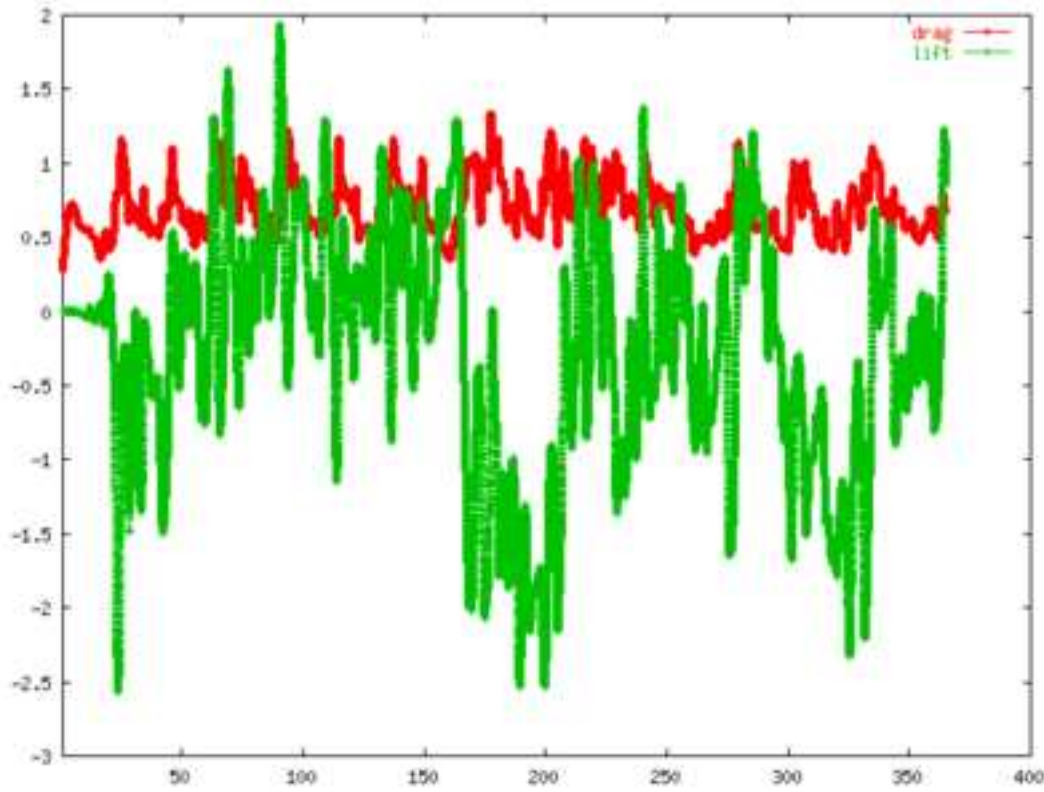
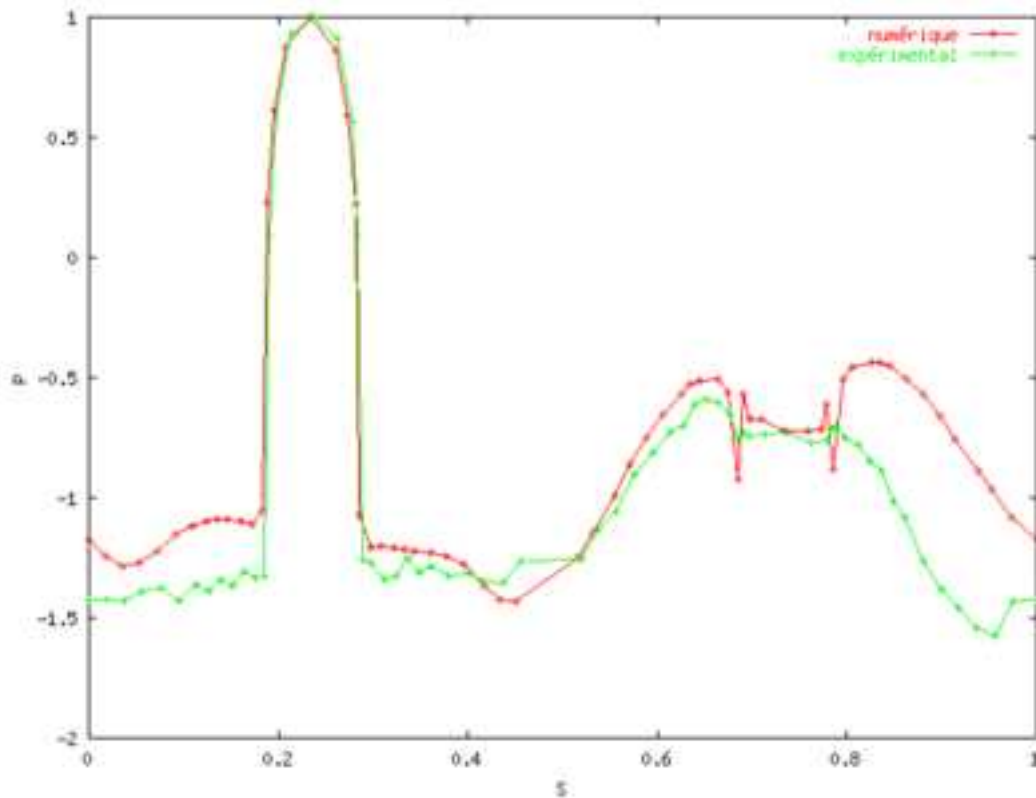


FIG. 41 – Évolution de la traînée et de la portance

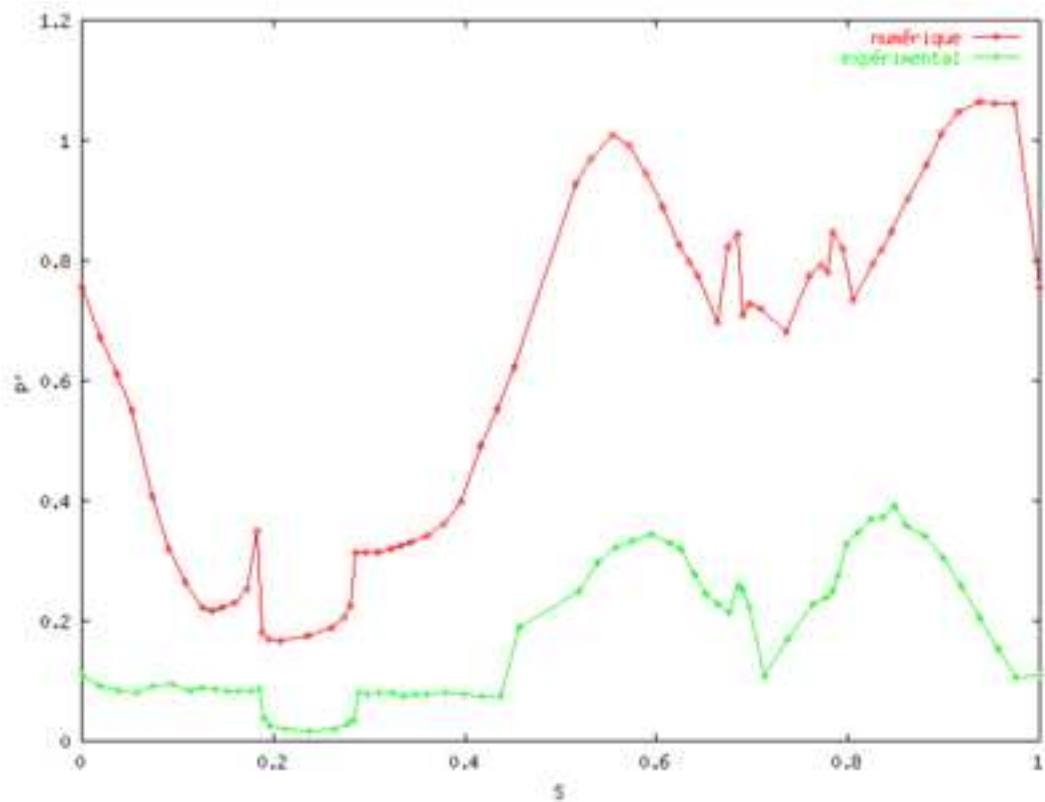
**Commentaires:**

Ceci est la seule simulation d'interaction fluide-structure que nous avons réalisée. On considère un cas d'oscillation forcée sur le plus petit maillage donnant de bons résultats dans les cas précédents. L'angle d'attaque est donné par :  $\theta(t) = 0.033 \cdot \sin(\omega_m t)$  où  $\omega_m$  est une pulsation imposée. La quantité intéressante à regarder est le coefficient d'amortissement CMmI donné dans notre cas par la formule :  $C_{MmI} = \frac{1}{8} \frac{1}{T} \int_{-T}^T M_{om}(t) \cdot \cos(\omega_m t) dt$ , d'autant plus qu'une expérience de Washizu et al nous permet de valider nos résultats. Un CMmI négatif signifie que le profil est instable à la fréquence considérée. Les simulations laminares effectuées sur un maillage grossier donnaient de bons résultats à haute fréquence mais sous-estimaient le CMmI à basse fréquence. Dans cette simulation on voit que le CMmI est au contraire largement surévalué. Il est

FIG. 42 – *Profil de pression*

probable que cela est dû aux accrochages résiduels de tourbillons qui ont une grande influence sur la valeur du moment. Une simulation plus longue ou sur un plus gros maillage pourrait donner de meilleurs résultats.

**Remarque :** la simulation n'a pas été poursuivie à haute fréquence à cause des grands temps de calculs impliqués (la simulation pour ces 2 fréquences a coûté 6 jours de calcul sur un processeur P4 à 2 GHz).

FIG. 43 – *Profil de pression*

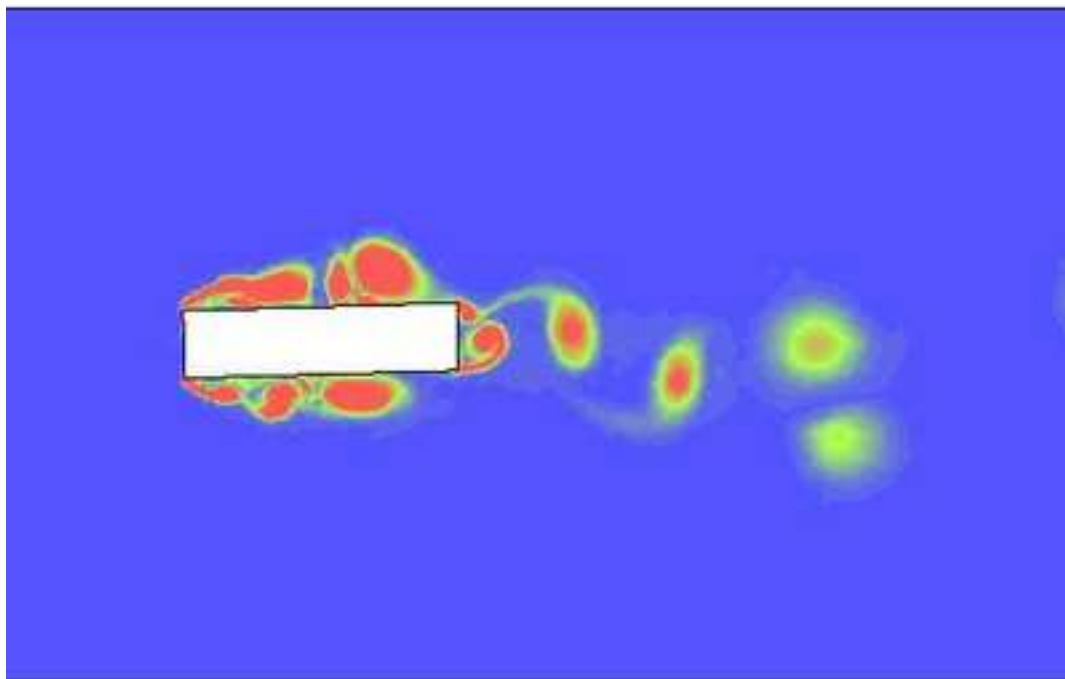


FIG. 44 – *Vorticité autour du profil.*

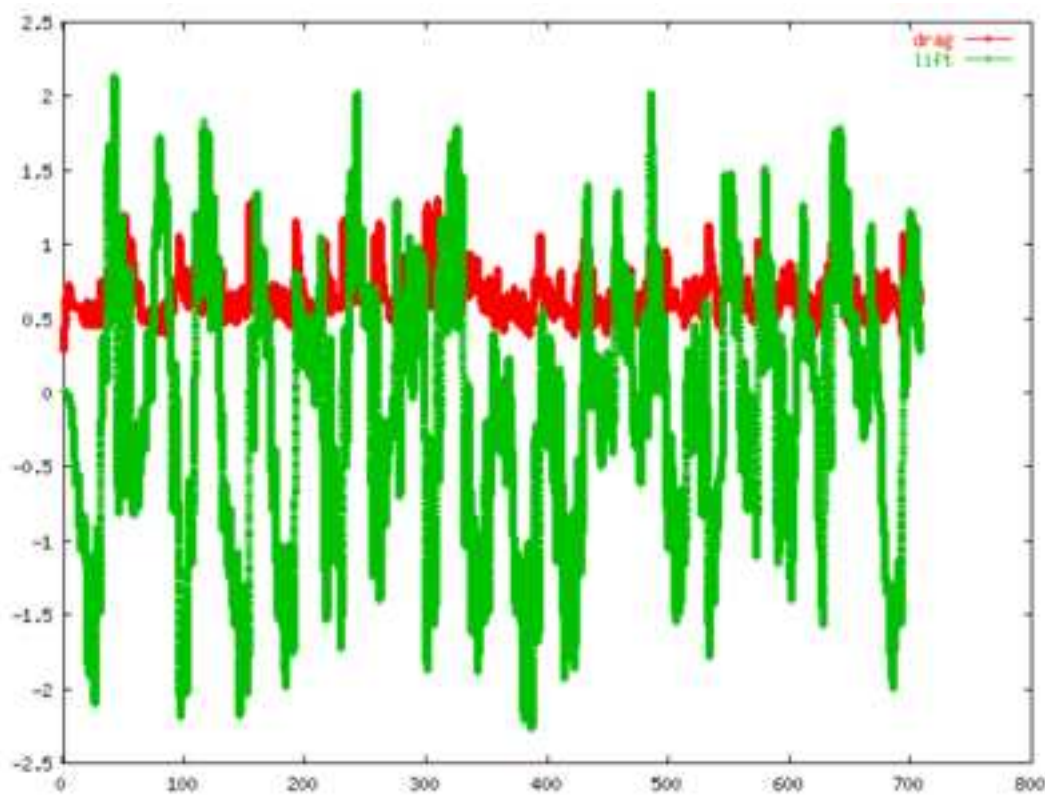


FIG. 45 – Évolution de la traînée et de la portance

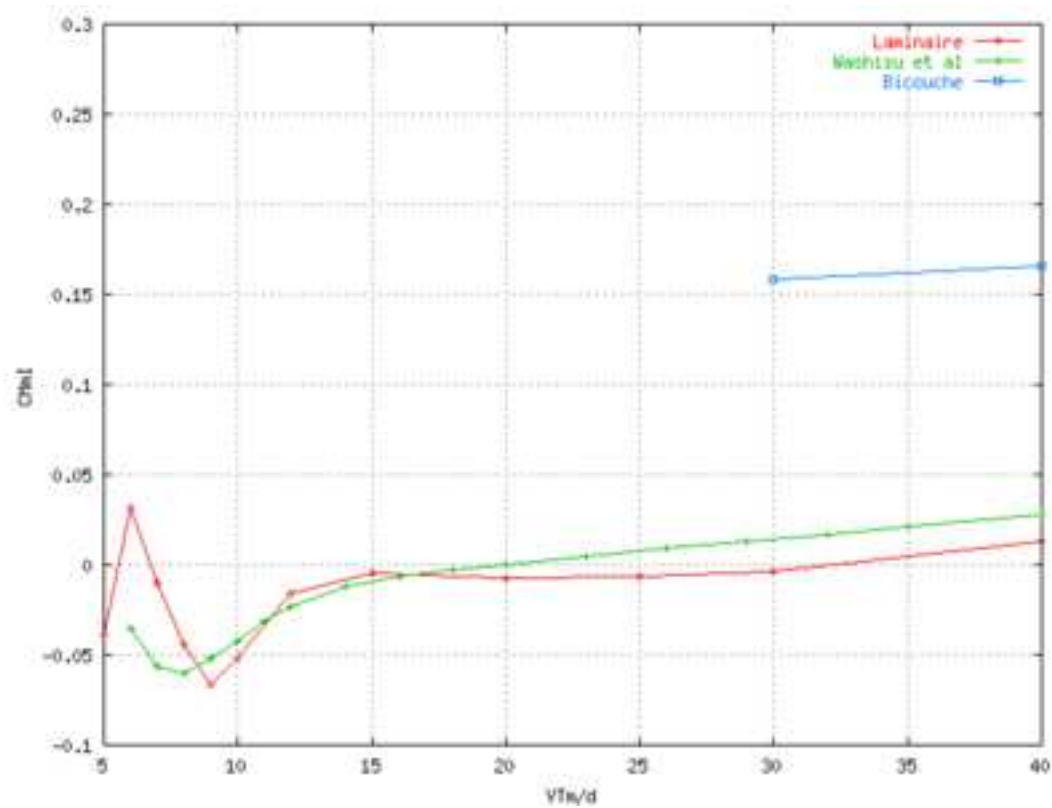


FIG. 46 –  $CMmI$  en fonction de la période du forage

## 2.11 Synthèse

### Les maillages:

- Les maillages avec **125 points** sur le profil ont montré qu'ils résolvaient mal les coins amonts mais ils semblent suffisants pour décrire la dynamique tourbillonnaire (voir 2.2.2). Un pas de temps de 0.02 est nécessaire (0.01 dans le cas de maillages raffinés à la paroi).
- Les maillages avec **250 points** sur le profil décrivent mieux l'écoulement aux coins et demandent un pas de temps de 0.01 (voir 2.3.1).
- **500 points** sur le profil n'apportent rien de mieux et oblige à un temps de calcul prohibitif (voir 2.6.1).
- La **symétrie** des maillages ne supprime pas les dissymétries observées dans les profils de pression (voir 2.5.2). Ceux-ci proviennent bien d'accrochages et d'entraînement de tourbillons dissymétriques car très sensibles aux perturbations aléatoires (erreurs numériques) amonts. De plus ces événements ont des fréquences plus basses que celle associées à la génération des tourbillons, durant une simulation on ne les observe que 3 ou 4 fois, et c'est ce qui provoque ces dissymétries.
- Un **raffinement aux coins amonts** permet d'obtenir de meilleurs résultats avec un nombre de points plus petit (voir 2.9.1).
- Un **raffinement à la paroi** n'apporte rien si on conserve un modèle loi de paroi mais il permet d'utiliser un modèle bi-couche qui lui donne de meilleurs résultats.
- Finalement le maillage **SYM\_250\_B2\_Y5** paraît être le meilleur compromis puisque qu'un maillage plus petit ne permet pas de se débarrasser des accrochages de tourbillons (voir plus bas).

### Les modèles de turbulence:

- Le **modèle de loi de paroi** est optimum avec un delta de 0.01 mais il est incapable de décrire correctement les zones de cisaillement aux coins



et à la paroi. Il aboutit à un accrochage des tourbillons sur le profil qui sont entraînés plus ou moins périodiquement (basses fréquences) et qui dissymétrisent le profil de pression (voir 2.3.1).

- **Sans loi de paroi**, la situation est encore pire puisque le cisaillement est sous-évalué au point de faire disparaître les tourbillons (voir 2.5.3).
- **Le modèle bi-couche** donne les meilleurs résultats. Sur le maillage à 250 points, 2 couches supplémentaires avec un premier point assez haut donnent le meilleur résultat, l'important semble être de placer la limite entre les deux zones à une altitude proche de  $y_+ = 200$  (voir 2.7.1). Un premier point plus près de la paroi conduit à une explosion de la simulation dû à la non convergence du calcul des caractéristiques près de la paroi (voir 2.8.1). Avec un maillage à 178 points sur le profil (raffiné au coins amonts) les meilleurs résultats sont obtenus avec 7 nouvelles couches et un premier point à  $y_+ = 2$  (voir 2.10.1). Malgré tout ce dernier maillage n'a pas été suffisant pour éliminer les accrochages de tourbillons, ce qui a conduit à une mauvaise estimation du coefficient d'amortissement en régime d'oscillation forcée (voir 2.10.2).

### 3 Conclusions

Les premières simulations avec des maillages non raffinés à la paroi et des modèles k-epsilon avec ou sans loi de paroi ont montré qu'en effet l'écoulement était mal décrit. Plus inquiétant, elles ont montré que de petits changements pouvaient induire de grosses variations dans sa forme (voir les différences entre les maillages asymétriques et symétriques (voir 2.3.1 et 2.5.1), ou avec moins de viscosité turbulente (voir 2.5.2).

La principale cause de ces mauvaises prédictions semble être la nécessité de bien décrire la zone de cisaillement générée aux coins amonts et la façon dont les tourbillons interagissent avec le profil. Le défaut observé le plus souvent est la tendance à accrocher les tourbillons sur le profil qui sont ensuite entraînés par le flot. Ceci qui génère des phénomènes basses fréquences non physiques.

Enfin l'utilisation d'un modèle de turbulence bi-couche a permis de reproduire un écoulement plus physique (voir 2.7.1). Pourtant l'utilisation de ce modèle ne va pas sans poser problème. En particulier il nécessite des points

très près de la paroi et donc des mailles très étirées (à moins de maillages beaucoup trop gros). Or les méthodes numériques de NSI3 réagissent mal à ce genre de géométrie. En particulier le calcul des caractéristiques ne converge pas près des parois quand les mailles sont trop petites. Un autre problème est la taille des maillages et les petits pas de temps qui conduisent à des simulations gourmandes en temps de calcul. Ceci nous a conduit à essayer de minimiser la taille du maillage pour le calcul en régime forcé.

Cette dernière simulation n'a pas donné les résultats que nous espérions. En effet nous attendions une amélioration de la prédiction du coefficient d'amortissement dans les basses fréquences de forçage puisque c'est dans cette zone que la qualité de la description de la dynamique des tourbillons devait être la plus sensible. Or cette simulation a donné des coefficients largement supérieurs à ceux attendus (voir 2.10.2). Si on examine en détail le déroulement de la simulation on constate que des arrachements basses fréquences de tourbillons sont présents. Ces fréquences étant du même ordre que celle du forçage sont probablement à l'origine de la mauvaise estimation du coefficient d'amortissement.

Finalement, les simulations à haut Reynolds avec des modèles de turbulence moyennée semblent très difficiles à valider sur des maillages mobiles. La prédiction correcte des coefficients aérodynamiques requiert une description fine de la dynamique tourbillonnaire et il n'est pas sûr que ces modèles de turbulence soient capables de le faire.

### **Perspectives:**

Nous proposons quand même des pistes pour tenter d'améliorer ce dernier résultat. Nous allons lancer une simulation sur un maillage plus fin et sur un temps d'échantillonnage plus long. Le calcul sera cependant très long (1 mois). Par ailleurs, il reste à vérifier que les quantités turbulentes sont bien prises en compte dans le code dans les cas de maillages mobiles.

Une autre voie d'amélioration possible est l'utilisation du schéma temporel au deuxième ordre récemment implémenté dans le NSI3FS. Cependant des tests préliminaires avec des modèles de turbulence ont montré l'apparition d'oscillations dans les zones maillées trop grossièrement.



---

Unité de recherche INRIA Sophia Antipolis  
2004, route des Lucioles - BP 93 - 06902 Sophia Antipolis Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Futurs : Parc Club Orsay Université - ZAC des Vignes  
4, rue Jacques Monod - 91893 ORSAY Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Lorraine : LORIA, Technopôle de Nancy-Brabois - Campus scientifique  
615, rue du Jardin Botanique - BP 101 - 54602 Villers-lès-Nancy Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Rennes : IRISA, Campus universitaire de Beaulieu - 35042 Rennes Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes : 655, avenue de l'Europe - 38334 Montbonnot Saint-Ismier (France)

Unité de recherche INRIA Rocquencourt : Domaine de Voluceau - Rocquencourt - BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex (France)

---

Éditeur  
INRIA - Domaine de Voluceau - Rocquencourt, BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex (France)  
<http://www.inria.fr>  
ISSN 0249-0803